



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO
CENTRO DE CIÊNCIAS MATEMÁTICAS E DA NATUREZA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA**

Guido Monteiro de Albuquerque

**COMPARAÇÕES GEOQUÍMICAS ENTRE OS CORPOS “A”
E “C” – MINA DE TURMALINA (Au), PITANGUI (MG)**

Trabalho Final de Curso

UFRJ
Rio de Janeiro
2019



Guido Monteiro de Albuquerque

COMPARAÇÕES GEOQUÍMICAS ENTRE OS CORPOS “A” E “C” – MINA DE TURMALINA (Au), PITANGUI (MG)

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de grau em Geologia.

Orientador: Atlas Correa Neto - Depto. Geologia/UFRJ

UFRJ
Rio de Janeiro
2019

FICHA CATALOGRÁFICA

GUIDO MONTEIRO DE ALBUQUERQUE

Comparações geoquímicas entre os corpos “A” e “C” – Mina de Turmalina (Au), Pitangui (MG) / Guido Monteiro de Albuquerque– Rio de Janeiro: UFRJ, Instituto de Geociências, 2019.

xi, 53 p.

Trabalho Final de Curso: Graduação em Geologia – Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ, Instituto de Geociências, Departamento de Geologia, 2019.

Orientador: Atlas Vasconcelos Correa Neto.

Guido Monteiro de Albuquerque

COMPARAÇÕES GEOQUÍMICAS ENTRE OS CORPOS “A” E “C” – MINA DE TURMALINA (Au), PITANGUI (MG)

Trabalho Final de Curso apresentado ao Programa de Graduação em Geologia, da Universidade Federal do Rio de Janeiro, como parte dos requisitos necessários à obtenção do título de grau em Geologia.

Orientador: Atlas Vasconcelos Correa Neto - Depto. Geologia/UFRJ

Orientador: Atlas Vasconcelos Correa Neto (UFRJ)

José Carlos Sicoli Seaone (UFRJ)

Mariana Brando Soares (UFRJ)

UFRJ
Rio de Janeiro
2019

Agradecimentos

Gostaria de agradecer primeiramente a todos brasileiros que pagam seus impostos todo mês, com muito suor, e, assim, tornaram possível que eu tivesse acesso a um curso superior público e de qualidade.

Aos meus pais, por sempre me apoiarem em todas as minhas escolhas, me encorajando, me chamando a atenção, me aconselhando e sempre querendo o melhor para mim. Amo vocês.

À minha namorada, Raphaela, por todo apoio, carinho, parceria nos piores e nos melhores momentos, tornando toda essa jornada mais leve e feliz.

Aos amigos do D.A, que viraram uma família, e que tanto me ensinam dia após dia, a semear o amor, a espontaneidade, a amizade e a gratidão. Obrigado por me mostrarem a beleza da nossa ciência e por sempre compartilharem os conhecimentos. Alguns nomes que não poderia deixar de mencionar: Caio Dominguez, Eric Biru, Roux, Julinha, Camilinha, Jhonny e Elisa, Pedrinho, Luis Santelli e João Pedro.

Aos colegas da turma de 2014, “Geolendas”, pela companhia ao longo desses anos. Em especial àqueles que se tornaram não apenas colegas, mas amigos e irmãos que levarei comigo para o resto da vida: Mariah, Chico, Adison e Lucas Batista; à vocês meu sincero obrigado!

À Jaguar *Mining* por viabilizar todo este trabalho, e pela digníssima recepção ao longo da etapa de campo. Em especial ao geólogo Vitor que me acompanhou ao longo da estadia na mina.

Também não poderia deixar de agradecer a todos os professores com quem tive o prazer de conhecer a Geologia. Em especial a professora Kátia, que acompanhou boa parte da minha trajetória, e a qual sou muito grato por tudo que fez por mim! Ao querido Atlas, por ser um professor amigo, por realizar os melhores campos e por me orientar neste trabalho.

À UFRJ, e todos seus funcionários, do setor de limpeza, do bandejão, da Geomata, Sergião da Xerox que tornaram tudo isso possível e agradável.

Resumo

DE ALBUQUERQUE, **Comparações geoquímicas entre os corpos “A” e “C” – Mina de Turmalina (Au), Pitangui (MG)**. Guido Monteiro. Rio de Janeiro, 2019. 47 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

O depósito aurífero Turmalina ocorre em rochas de idade arqueana do *Greenstone Belt* Pitangui, localizado na porção noroeste do Quadrilátero Ferrífero (QF), e é composto pelos alvos exploratórios A, B, C, Faina e Pontal. A estratigrafia da mina contempla unidades máfico-ultramáficas, vulcano-sedimentares e corpos ígneos intrusivos, metamorfisados em fácies anfibolito. São reconhecidos três conjuntos de sulfetos relacionados à dois estágios de mineralização aurífera. Os fluídos hidrotermais responsáveis pela mineralização no depósito de Turmalina derivam, possivelmente, da desidratação das rochas do *Greenstone Belt*, com contribuição de fluídos magmáticos durante a colocação do *stock* granítico. Aqui, investigamos esse depósito do ponto de vista geoquímico, através do uso de análises multi-elementares e de rocha total, além de modelamento geológico simplificado. Seis testemunhos de sondagem, representativos dos corpos A e C foram descritos para este trabalho, dos quais 95 intervalos mineralizados foram amostrados para análises multi-elementar. Os intervalos mineralizados correspondem ao quartzo-clorita xisto e biotita-clorita-quartzo xisto, cujo protólito corresponde predominantemente a basaltos subalcalinos, andesitos e rochas sedimentares. As análises mostram correlação positiva de Au com As, Ag, Bi, S, para ambos os corpos, sendo o corpo C mais rico em Ag e S que o corpo A. Cu e Co apresentam valores variados, porém mostram tendência positiva para o corpo C, sendo no geral mais ricos nesse corpo também. Te e Zn apresentam, em C, maiores concentrações e correlação positiva com Au, enquanto para o corpo A as concentrações desses elementos são baixas e não há *trend*. O ouro está preferencialmente ligado a arsenopirita, o que é reforçado pela correlação positiva nos dois corpos de Au com As e S. A relação do ouro com arsenopirita é uma diferença marcante entre o depósito Turmalina e o depósito São Sebastião, outro depósito aurífero hospedado em rochas do *Greenstone Belt* Pitangui. Esta diferença pode indicar processos mineralizantes distintos ocorrendo em rochas de natureza e idade similares.

Palavras-chave: Depósito Turmalina; Ouro; *Greenstone Belt* Pitangui; Geoquímica; Modelamento Geológico.

Abstract

DE ALBUQUERQUE, Guido Monteiro. Rio de Janeiro, 2019. 47 p. Trabalho Final de Curso (Geologia) - Departamento de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro.

The Turmalina gold deposit is hosted in the Archean Pitangui greenstone belt in the northwestern portion of the Quadrilátero Ferrífero (QF), and comprises the orebodies A, B, C, D, Faina and Pontal. The mine stratigraphy is composed by a mafic-ultramafic, volcano-sedimentary unities and intrusive igneous bodies metamorphosed under amphibolite conditions. There are 3 sulfide assemblages related to 2 gold mineralization stages. Hydrothermal fluids responsible for mineralization in the Turmalina deposit derived from the dehydration of rocks from the greenstone belt, with possible contribution of magmatic fluids during the emplacement of a granite stock. Here we investigate this deposit with a geochemistry point-of-view, through the use of whole-rock and multi-element analyses. Six diamond drill-cores that encompass the orebodies A and C were described for this work from which 95 mineralized intervals were sampled for multi-element analyses. Mineralized intervals correspond to quartz-chlorite and biotite-chlorite-quartz schist, whose protolith corresponds predominantly to sub-alkaline basalt, andesite and sedimentary rocks. Au correlates positively with As, Ag, Bi and S, for both bodies, so that orebody C shows higher Ag and S concentration. Cu and Co show a slightly positive trend for orebody C, being more concentrated there as well. Te and Zn show higher concentrations and positive correlation in orebody C and none in orebody A. Gold at Turmalina is preferably associated with arsenopyrite when compared to others sulfides, and that is reinforced by the positive trends between Au and As and S. This correlation between Au and As represents a striking difference between the São Sebastião and Turmalina gold deposits, which are hosted in the same greenstone belt. Although these two deposits are hosted in similar rocks and are chronologically related, they might have undergone different mineralizing processes.

Key-words: Turmalina deposit; Gold; Pitangui Greenstone Belt; Geochemistry; Geological Modelling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Esboço de mapa do sul do Cráton São Francisco mostrando os principais terrenos arqueanos e os entornos arqueanos/paleoproterozoicos que foram retrabalhados no proterozoico (Cinturão Mineiro e Faixa Araçuai). Retirado de Romano et al., 2013.....	3
Figura 2: Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero e arredores, incluindo a localização do depósito São Sebastião e algumas das minas de ouro e depósitos. Modificado de Brando Soares et al. (2018, 2019). 1. Área do depósito São Sebastião; 2. São Francisco – áreas-alvo do Barreiro; 3. Alvo de Onça Pitangui; 4. Alvo de ouro de Vilaça. I. Turalina, II. São Sebastião, III. Mina de Cuiabá, IV. Morro Velho/ Mina Grande.....	6
Figura 3: Mapa com as principais ocorrências de ouro em Minas Gerais. Os números são referentes a minas ativas ou inativas e escavações históricas. O número 19 representa o depósito de Turmalina, foco de estudo deste trabalho. Os números 18, 19 e 23 são de depósitos localizados no <i>Greenstone Belt</i> Pitangui. Retirado de http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ouro/#ouro-em-minas-gerais (acessado em 05/05/2019).	Erro! Indicador não definido.
Figura 4: Mapa Geológico do Greenstone Belt Pitangui, com destaque para os depósitos do Complexo Turmalina. Esse mapa foi carinhosamente cedido pela MSOL.	14
Figura 5: Foto tirada durante trabalho de campo, do alto da pilha de rejeito da mina. Imagem mostra a extensão da zona mineralizada, com destaque para antigas cavas, dos corpos C, A e Faina.	15
Figura 6: Visualização 3D das galerias e furos de sondagem do corpo C que serão analisados neste trabalho. Imagem fornecida pela Jaguar Mining.	18
Figura 7: Seção horizontal dos testemunhos descritos do corpo C (FTS1486, FTS1488, FTS1487). (ACX=Actinolita Clorita Xisto; CQX=Clorita Quartzo Xisto; QCX=Quartzo Clorita Xisto). Os pontos pretos são referentes as amostras de geoquímica de rocha total. As setas indicam os resultados litológico obtidos a partir do diagrama TAS (Middlemost, 1994).....	19
Figura 8: (a) Metabasalto foliado; (b) Metabasato porfírico	20
Figura 9: Amostra de clorita quartzo xisto crenulado. Intercalações entre bandas ricas em quartzo e ricas em mica.....	21
Figura 10: Amostra de metatufos cortado por veio de quartzo. Furo FTS-1486 (Corpo C).....	21
Figura 11: A imagem retrata a zona mineralizada do furo FTS-1486, corpo C. Os gráficos são de valores de ouro (azul), arsênio (cinza) e prata (amarelo). A tabela ao lado mostra, para cada intervalo selecionado, os tipos de sulfetos e intensidade de ocorrência; tipos e intensidade de alteração hidrotermal; estilo de mineralização. (Py=pirita; Apy=arsenopirita; Po=pirrotita; Cpy=calcopirita).	22
Figura 13: Seção horizontal do corpo C com corpo de minério (Furos FTS1486, FTS1488, FTS1487).	23
Figura 12: a) amostra do furo FTS-1486, minério de alto teor associado a veio de quartzo; b) sulfetação fina e disseminada em minério de alto teor, Furo FTS-1486; c) textura de brecha em minério de alto teor (Furo FTS-1488).....	23
Figura 14: Visualização 3D das galerias e furos de sondagem do corpo A que serão analisados neste trabalho. Imagem fornecida pela Jaguar Mining.	24
Figura 15: Seção horizontal dos testemunhos descritos do corpo A (FTS1655, FTS1653, FTS1657). (ACX=Actinolita Clorita Xisto; ACBX=Actinolita Clorita Biotita Xisto; BCQX=Biotita Clorita Quartzo Xisto; BCX=Biotita Clorita Xisto). Os pontos pretos são referentes as amostras de geoquímica de rocha total. As setas indicam os resultados litológicos obtidos a partir do diagrama TAS (Middlemost, 1994).	25
Figura 16: Amostra de biotita clorita quartzo xisto dobrado.	27
Figura 17: amostra da apófise de granito, em FTS-1655.	27
Figura 18: A imagem retrata a zona mineralizada do furo FTS-1655, Corpo A. Os gráficos são de valores de ouro (azul), arsênio (cinza) e prata (amarelo). A tabela ao lado mostra, para cada intervalo selecionado, os tipos de sulfetos e intensidade de ocorrência; tipos e intensidade de alteração hidrotermal; estilo de mineralização. (Py=pirita; Apy=arsenopirita; Po=pirrotita; Cpy=calcopirita).	28

Figura 19: Seção horizontal do corpo A com corpo de minério (Furos FTS1653, FTS1655, FTS1657).	29
Figura 20: amostra representativa de zona de alto teor, com sulfetação fina e disseminada, de principalmente arsenopirita (FTS-1657).	30
Figura 21: Diagrama TAS (Middlemost 1994) de Na ₂ O + K ₂ O por SiO ₂ . (= Actinolita clorita xisto 2; = Actinolita clorita xisto porfirítico; = Quartzo clorita xisto (Corpo C); = Biotita clorita xisto; = Actinolita clorita biotita xisto; = Actinolita clorita xisto 1; =Biotita clorita quartzo xisto). Dados de rocha total dos corpos A e C (total=23 amostras).	31
Figura 22: Diagrama spider, normalizado para elementos terras raras do condrito (Bonyton 1984). Análise dos corpos C (preto) e A (verde).	32
Figura 23: Diagramas tipo harker. (Basaltos-corpo C (preto); basaltos-corpo A (verde); metassedimentar-corpo C (amarelo); andesito basáltico-corpo A (roxo)). Mostra-se as variações de TiO ₂ , Al ₂ O ₃ , P ₂ O ₅ (elementos maiores pouco móveis), FeO e MgO (elementos maiores móveis), Cr e Ni (elementos traço conservativos) e Y versus Zr.	34
Figura 24: : Diagrama logarítmico de variação de elementos para os corpos mineralizados A (vermelho) e C (preto). As análises mostram correlação positiva de Au com As, Ag, Bi, S, para ambos os corpos, sendo o corpo C mais rico em Ag e S que o corpo A. Cu e Co apresentam valores variados, porém mostram tendência positiva para o corpo C, sendo no geral mais ricos nesse corpo também. Te e Zn apresentam, em C, maiores concentrações e correlação positiva com Au, enquanto para o corpo A as concentrações são baixas e não há <i>trend</i>	36
Figura 25: a) Modelo geológico simplificado do corpo A, a partir da descrição dos furos FTS-1655, FTS-1653 e FTS-1657. (Verde=actinolita clorita xisto (anfíbolito); azul escuro=actinolita clorita biotita xisto (metaandesito basáltico); rosa=biotita clorita quartzo xisto (metadacito); azul claro=biotita clorita xisto (metaandesito); vermelho=metagranitoide). b) Seção vertical do corpo A.	37
Figura 26: Seção vertical do modelo litológico com modelo do corpo de minério (Au) sobreposto. As cores cinza e laranja representam as classes de ouro definidas; respectivamente, de alto teor (>5 g/t) e teor médio (1-5 g/t).	38
Figura 27: a) Modelo geológico simplificado do corpo C, a partir da descrição dos furos FTS-1488, FTS-1486 e FTS-1487. (Verde=actinolita clorita xisto (anfíbolito); verde escuro= actinolita clorita xisto porfirítico (anfíbolito); laranja=clorita quartzo xisto; amarelo =quartzo clorita xisto (metassedimentar); preto=xisto grafitoso; roxo= metatufo; vermelho=actinolita clorita xisto (metaandesito). b) Seção vertical do corpo C.	39
Figura 28: Seção vertical do modelo litológico com modelo do corpo de minério (Au) sobreposto. As cores cinza e vermelho representam as classes de ouro definidas; respectivamente, de teor médio (1-5 g/t) e de alto teor (>5 g/t).	39
Figura 29: Corpos de minério de prata dos corpos A (a) e C (b). Classes de teor definidas pelo software: 0,13-0,29 g/t; >0,29 g/t.	40
Figura 30: a) Visão do posicionamento espacial dos furos trabalhados, corpo C (superior) e A (inferior), em relação a superfície. b) Modelo geológico conjugado e extrapolado dos corpos A e C, da mina de Turmalina. (Legenda de cores: vinho=metaandesito; amarelo= conjunto metavulcano-sedimentar; verde=conjunto metavulcânico máfico (A e C); rosa=metaandesito basáltico; laranja=metadacito; azul=metaandesito).	42
Figura 31: Modelo geológico conjugado sobreposto por mapa geológico, cedido pela MSOL. (Corpo D é continuação do corpo A).	43

Sumário

Resumo	iv
<i>Abstract</i>	v
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Objetivo	1
2. GEOLOGIA REGIONAL	2
2.1. Arcabouço tectonoestratigráfico regional	2
2.2. <i>Greenstone Belt</i> Pitangui	4
2.3. Depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero	7
2.4. Depósitos de ouro Turmalina	11
3. MATERIAIS E MÉTODOS	14
3.1. Trabalho de campo	14
3.2. Análise Geoquímica	16
3.2.1. Geoquímica Multi-elementar	16
3.2.1. Geoquímica de rocha total	16
3.3. Modelamento Geológico Simplificado	17
4. RESULTADOS	18
4.1. Descrição de testemunhos e estratigrafia	18
4.1.1. Corpo C	18
4.1.2. Corpo A	24
4.2. Geoquímica de rocha total	31
4.3. Geoquímica Multi-elementar	35
4.3. Modelo Geológico Simplificado	37
5. DISCUSSÃO	43
6. CONCLUSÕES	45
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	46

1. INTRODUÇÃO

Este trabalho é mais um resultado do projeto de pesquisa mineral que vem sendo realizado, desde 2010, na região do *Greenstone Belt* Pitangui, pelo professor Atlas Vasconcelos Correa Neto, do departamento de Geologia da UFRJ. Esse projeto conta com a parceria da IAMGOLD e Jaguar Mining. Diversos trabalhos já foram realizados na região, a partir desse projeto: Mariana Brando Soares (doutorado), Kathelyn, Lorrana, Vitor Caputo e Mariana Mozart (Trabalhos de Conclusão de Curso), e outros estão em andamento.

O QF, localizado no limite sudeste do Cráton São Francisco, é conhecido por ser uma província mineral que contém alguns dos maiores depósitos de Fe e de Au do mundo, além de inúmeros outros depósitos menores. Grande parte dos depósitos auríferos dessa região estão hospedados nas rochas arqueanas do Grupo Nova Lima, base do *Greenstone Belt* Rio das Velhas. Esse terreno *greenstone*, por sua vez, é tradicionalmente considerado como cronocorrelato ao *Greenstone Belt* Pitangui, localizado a noroeste dessa província.

O *Greenstone Belt* Pitangui, diferentemente do Rio das Velhas, possui apenas dois depósitos de ouro principais: Turmalina (~3MozAu- RPA Consultoria e Jaguar Mining Inc., 2017) e São Sebastião (0,679MozAu@5g/tAu; (SRK consultoria e IAMGOLD CORPORATION, 2014). Enquanto o depósito São Sebastião possui a mineralização associada a Formações Ferríferas Bandadas, assim como a maioria dos depósitos do QF, na mina Turmalina as mineralizações ocorrem tanto em rochas metassedimentares quanto em rochas metavulcânicas máficas, pertencentes ao Grupo Pitangui. Este grupo compõe a sequência metavulcano-sedimentar do *greenstone*, sobreposta ao embasamento granítico. Essas rochas são cortadas pelo Lineamento Pitangui, com largura de, aproximadamente, 20km, que divide-se em 3 zonas de cisalhamento principais, correspondendo a uma faixa colisional, com granitos tarditectônicos dispostos ao longo dessa faixa (Romano, 2006). Exemplo desses corpos intrusivos é o Granito Casquilho (Suíte Mato Dentro) que aflora na parte sudeste da mina e corta as rochas mineralizadas.

Dada a dificuldade de mapeamento geológico, pela escassez de afloramentos, Brando Soares et al., 2018 propuseram, com base em descrição de testemunhos do depósito São Sebastião, uma nova e detalhada coluna estratigráfica para o

Greenstone Belt Pitangui e estabeleceram também posicionamento cronológico, com base em dados isotópicos de U-Pb e Lu-Hf a partir de zircões detríticos ao revelar uma idade de deposição máxima de $2,86 \pm 0,15$ Ga.

Apesar de novos dados terem sido apresentados recentemente sobre esse *Greenstone Belt* (Brando Soares et al., 2017, 2018; Fabrício-Silva et al., 2018; Tassinari et al., 2015 Verma et al., 2017), pouco ainda se sabe sobre os processos e o *timing* da mineralização, e sobre a relação entre os depósitos desse *greenstone belt* e os níveis estratigráficos em que eles ocorrem.

1.1. Objetivo

Esse trabalho tem como objetivo realizar um estudo de associações metálicas com o ouro para os corpos A e C da mina Turmalina e compará-las com os resultados obtidos por Brando Soares et al., 2018, no depósito São Sebastião. Objetiva-se também entender a estratigrafia da mina, a partir da elaboração de modelo litológico 3D simplificado. O modelo 3D do corpo de minério foi desenvolvido para comparar a disposição espacial dos corpos mineralizados A e C. Além disso, pretende-se caracterizar as diferenças nos processos mineralizantes que ocorreram nessa região, tanto entre os corpos A e C, quanto entre esses e o depósito São Sebastião. Esse trabalho visa ajudar na criação e aperfeiçoamento de modelos de pesquisa mineral para a região de estudo.

2. GEOLOGIA REGIONAL

2.1. Arcabouço tectonoestratigráfico regional

O Quadrilátero Ferrífero está localizado na porção sul do Cráton São Francisco (Figura 1), o qual é subdividido em diversos blocos arqueanos e paleoproterozoicos delimitados por grandes zonas de sutura de 2100 a 2000 Ma (Almeida et al., 1981; Teixeira and Figueiredo, 1991; Ledru et al., 1994; Teixeira et al., 1996, 2000; Barbosa e Sabate, 2004). O terreno cratônico compreende *greenstone belts* arqueanos metamorfisados, terrenos granito-gnáissicos arqueanos e paleoproterozoicos, e sequências metassedimentares do neoarqueano ao neoproterozoico (Dorr, 1969; Renger et al., 1994; Alkmim and Marshak, 1998; Baltazar and Zucchetti, 2007).

O terreno granito-gnáissico é composto de gnáisses trondhjemitó-tonalito-granodiorito (TTG) (e.g., Complexos Belo Horizonte, Caeté, Santa Bárbara e Bação), os quais, de acordo com Teixeira et al., 1996, se formaram no intervalo de 3380 a 2900 Ma. Essas rochas sofreram metamorfismo, entre 2920 e 2834 Ma, durante o Evento Belo Horizonte, descrito por Schrank e Machado (1996b) e Schrank et al. (2002) e posteriormente serviram como área fonte de detritos para o *Greenstone Belt* Rio das Velhas.

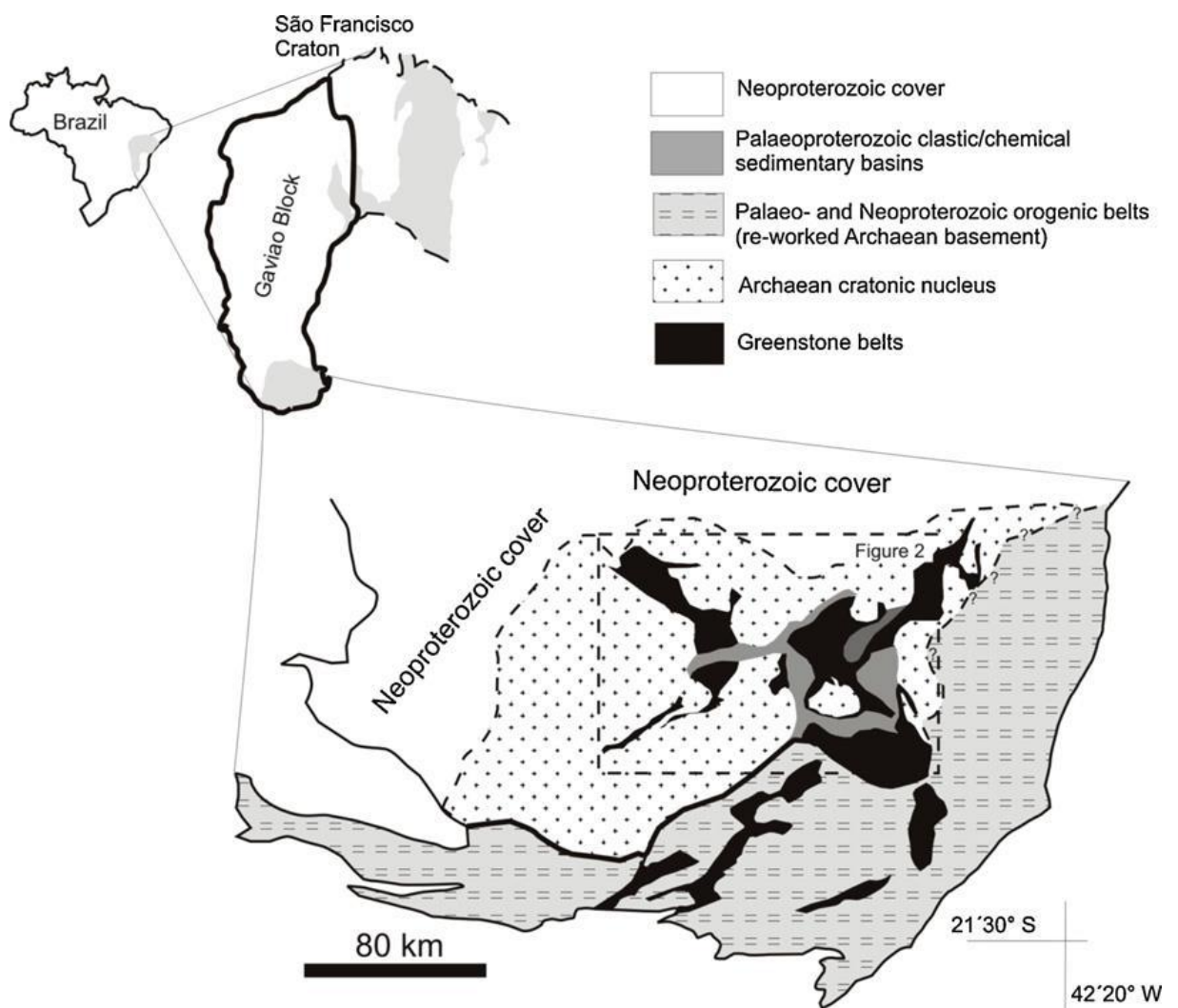


Figura 1: Esboço de mapa do sul do Cráton São Francisco mostrando os principais terrenos arqueanos e os entornos arqueanos/paleoproterozoicos que foram retrabalhados no proterozoico (Cinturão Mineiro e Faixa Araçuaí). Retirado de Romano et al., 2013.

O O *Greenstone Belt* Rio das Velhas foi tectonicamente deformado durante o Evento Orogênico Rio das Velhas (2.75–2.67 Ga – Carneiro, 1992; Baltazar e

Zucchetti, 2007), a Orogenia Minas (~2.1 Ga – Teixeira et al., 2015) e durante o Evento Brasileiro (0.65–0.50 Ga – Chemale et al., 1994; Alkmim e Marshak, 1998; Lobato et al., 2001a; Noce et al., 2005, 2007).

O Supergrupo Minas sobrepõe as rochas da Supergrupo Rio das Velhas ao longo de uma inconformidade bem pronunciada (Dorr, 1969). A idade de sedimentação para essas rochas data do paleoproterozoico, entre 2580 e 2050 Ma, em uma bacia de margem continental (Renger et al., 1994; Baltazar e Zuchetti, 2007). De acordo com Machado (1996), os mecanismos que geraram a subsidência da bacia minas estão provavelmente relacionados ao relaxamento térmico da crosta com o fim da atividade magmática arqueana do *greenstone belt*. Essa fase final de magmatismo é atribuída por Farina et al., 2015 ao Evento Mamona, caracterizado por intrusões de granitoides potássicos de 2,76 a 2,68 Ga.

As Unidades proterozoicas que cobrem a região constituem o Supergrupo Espinhaço e o Grupo Bambuí. As rochas da Bacia Espinhaço foram depositadas entre 1,8 e 1,0 Ga (Guadagnin et al., 2015). Tratam-se de conglomerados, arenitos e rochas máficas, expostas na porção nordeste do Quadrilátero Ferrífero (Vial et al., 2007). As rochas que constituem o Grupo Bambuí são pelitos e carbonatos, depositados em bacia de margem passiva que evoluiu para uma bacia *foreland* (Zalan e Silva, 2012).

2.2. Greenstone Belt Pitangui

O *Greenstone Belt* Pitangui é um sinclínório de *trend* NW, limitado a sudoeste pelo Complexo Divinópolis e a nordeste pelo Complexo Belo Horizonte. A parte nordeste do cinturão é delimitada pelos complexos intrusivos Pequi e Florestal, enquanto a sudeste do cinturão ocorre o *stock* granítico Jaguará (figura 2). Para o noroeste, o cinturão é coberto pelas rochas sedimentares neoproterozoicas do Grupo Bambuí.

Esse *Greenstone Belt* é tido tradicionalmente como sendo uma continuação do *Greenstone Belt* Rio das Velhas, com base em similaridades estratigráficas e de idades isotópicas (Brando Soares et al., 2017). Estes cinturões são separados por tectônica e/ou ascensão de complexos dômicos (Romano, 2007; Romano et al., 2013).

Romano (2007) realizou mapeamento da Folha Pará de Minas e reconheceu três grandes domínios litológicos precambrianos para o *Greenstone Belt* Pitangui: embasamento cratônico (gnáisses e migmatitos), sequência *greenstone belt* e intrusões de granitoides. Dados geocronológicos desse *Greenstone Belt* são restritos; Silva (2016) obteve idade de 2876 ± 7 Ma (U-Pb) em Metagranodiorito do embasamento, correspondente ao Complexo Divinópolis; Romano et al. (1989 e 2013) apresentou idades U-Pb em zircão entre 2,59 Ga e 2,75 Ga (Batólito Florestal) para granitoides intrusivos.; Brando Soares et al., 2017 estimou em 2,86 Ga a idade máxima de deposição para meta arenito da base do *greenstone belt*.

A estratigrafia proposta por Romano (2007) define duas unidades para a sequência de rochas do *greenstone belt*. A unidade inferior é composta por rochas metavulcânicas ultramáficas e máficas, intercaladas com formações ferríferas bandadas do tipo algoma, metagrauvaca turbidítica e filitos carbonosos. A unidade superior compreende rochas metassedimentares clásticas que incluem metagrauvas turbidíticas e filitos carbonosos. Alternativamente, Brando Soares et al., 2017, através de mapeamento de detalhe, utilizando furos de sondagem do depósito São Sebastião, definiram três unidades para essa mesma sequência de rochas: i) unidade inferior composta predominantemente de rochas metavulcânicas máficas e ultramáficas intercaladas com intervalos metassedimentares delgados de formações ferríferas (BIFS), metaarenitos turbidíticos e metapelitos; ii) unidade intermediária de metassedimentos turbidíticos intercalados com rochas vulcânicas intermediárias, e com menor proporção de BIFs e quartzitos; iii) unidade superior composta de quartzitos e metaconglomerados polimíticos.

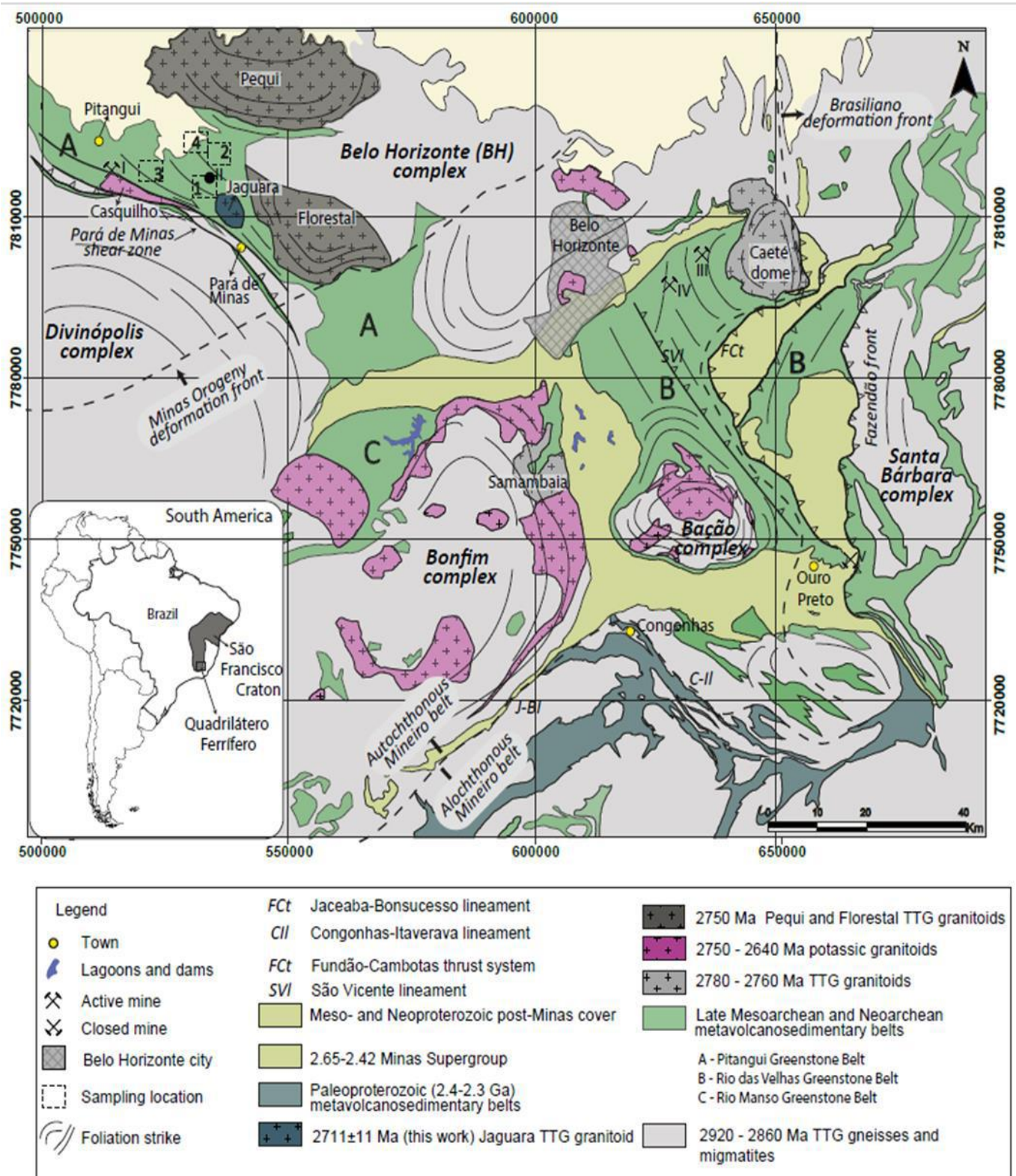


Figura 2: Geologia simplificada do Quadrilátero Ferrífero e arredores, incluindo a localização do depósito São Sebastião e algumas das minas de ouro e depósitos. Modificado de Brando Soares et al. (2018, 2019). 1. Área do depósito São Sebastião; 2. São Francisco – áreas-alvo do Barreiro; 3. Alvo de Onça Pitangui; 4. Alvo de ouro de Vilaça. I. Turmalina, II. São Sebastião, III. Mina de Cuiabá, IV. Morro Velho/ Mina Grande.

As condições de metamorfismo, de acordo com paragêneses minerais metamórficas estudadas por Brando Soares *et al.* (2017) e Santos (2017), são características de fácies xisto-verde alto (clorita, talco, biotita, actinolita e sericita) gradando para fácies anfibolito baixo onde há presença de grunerita-cummingtonita e hornblenda em menor volume, nas BIFs. Em contrapartida, Romano (2006) sugeriu condições de fácies anfibolito baixo a média para toda a sequência.

Esse cinturão de rochas registra uma típica história de evolução de uma bacia oceânica, com grandes derrames vulcânicos na base, deposição de sedimentos durante momentos de quiescência e deposição de BIF sob condições de bacia faminta, enquanto a deposição dos conglomerados sugere o início de uma nova bacia (Brando Soares *et al.*, 2017). Apesar das similaridades estratigráficas com o *Greenstone Belt* Rio das Velhas, o trabalho de Verma *et al.*, (2017) aponta que esse cinturão principal é composto majoritariamente de komatiitos e basaltos de alto Mg, enquanto o *Greenstone Belt* Pitangui é composto de basaltos normais. Esse mesmo autor sugere ainda ambiente do tipo *Middle Ocean Ridge Basalt* (MORB) a *Island Arc* (IA) para este cinturão, devido à ausência de rochas intermediárias no contexto de MORB. Além disso, segundo Brando Soares *et al.*, 2018, a fácies metamórfica anfibolito encontrada para o *Greenstone Belt* Pitangui indica que essas rochas estão situadas em um nível crustal mais profundo que aquelas da porção central do Quadrilátero Ferrífero, que, por sua vez, registram metamorfismo em fácies xisto verde.

2.3. Depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF), localizada no sul do Estado de Minas Gerais, é a área com a mais importante produção de ouro do Brasil (Vial *et al.*, 2006). Na região, ocorrem dois depósitos de ouro de classe mundial: Morro Velho e Cuiabá. A mina de Morro Velho iniciou sua produção em 1834, e tem uma produção acumulada de 15 Moz de ouro, enquanto a mina de Cuiabá contém 5 Moz, incluindo produção e reservas (Vial *et al.*, 2006). Além desses dois depósitos de classe mundial, três depósitos de tamanho intermediário (Raposos, São Bento e Passagem de Mariana) e centenas de depósitos pequenos de ouro ocorrem nessa província mineral (Vial *et al.*, 2007) (figura 3).

De uma maneira geral, os depósitos são assumidos como sendo do tipo ouro orogênico, com base na classificação de Groves (1998), e possuem correlação temporal e espacial com a Orogenia Rio das Velhas (Vial et al., 2007). De acordo com Groves (2003) esse tipo de depósito pode ser formado em todos estágios de evolução do orógeno, de modo que os cinturões metamórficos em evolução possam conter diversos depósitos de ouro justapostos e/ou superpostos. Este fato, particularmente, pode tornar bem complexa a história de evolução dos depósitos.

A idade das mineralizações de ouro é um assunto ainda muito debatido na bibliografia. Segundo Lobato (2007), a evolução policíclica das rochas do QF gerou distúrbio generalizado na maioria dos sistemas isotópicos, tornando datação direta das mineralizações de ouro uma tarefa bem difícil. Até o momento, dados geocronológicos disponíveis sugerem idade neoarqueana (Lobato (2007) obteve idade de 2672 ± 14 Ma em monazita hidrotermal para os depósitos Cuiabá e Morro Velho; Vial et al., 2007 encontrou 2.82 ± 0.05 Ga para Morro Velho; Noce et al., 2007 indica idade média de 2.7 Ga para todo QF). E, segundo Zucchetti e Baltazar (1998) e Lobato 2001a), os principais lineamentos tectônicos que hospedam as mineralizações de ouro são interrompidos a norte e sudeste pela sequência paleoproterozoica do Supergurpo Minas, o que também sustenta uma idade mínima neoarqueana para as mineralizações.

As rochas hospedeiras das mineralizações compõe o Grupo Nova Lima, base do *Greenstone Belt* Rio das Velhas. Dentre elas, Lobato (2001a) definiu 3 grupos principais, segundo as ocorrências em depósitos conhecidos: a) formações ferríferas bandadas metamorfisadas (correspondem a 49% das ocorrências); b) lapa seca; este termo era utilizado para classificação litológica, porém, hoje, sabe-se que corresponde a um tipo de alteração hidrotermal (representa 47%); c) metabasaltos e rochas metassedimentares (apenas 4% das ocorrências). Além disso, acima e/ou abaixo dessas unidades mineralizadas, comumente ocorrem níveis de filito carbonoso, que atuam como barreira física e química para o fluido mineralizante (Lobato, 2001b).

O controle estrutural e ligação ou a zonas de cisalhamento ou dobras, além de boa extensão ao longo do mergulho (até 5 km) é uma característica comum de todos esses depósitos (Vial et al., 2007). As estruturas que os controlam são zonas de cisalhamento referentes a segunda fase de deformação (D2) (Baltazar e Zuchetti, 2007), sendo o mergulho do corpo de minério correspondente a lineação

de estiramento (Vial et al., 2007). Essas zonas de cisalhamento mineralizadas (ex. Lineamento Paciência) possuem orientação NW-SE e são acomodadas por falhas transcorrentes E-W, promovendo ambiente favorável a deposição de ouro (Vieira, 1991; Lobato et al. 1998; Lobato, 2001b). Os maiores recursos de ouro estão associados as estruturas secundárias (falhas E-W), enquanto ao longo das zonas de cisalhamento principais os corpos de minério tendem a ser menores (Lobato, 2001b). As áreas de interseção entre corpos de minério normalmente mostram aumento no conteúdo de ouro (Fabricio-Silva et al., 2018).

Os fluídos hidrotermais são responsáveis por modificar a assembleia mineral metamórfica das rochas do Grupo Nova Lima, principalmente nas proximidades de depósitos de ouro (Lobato, 2001a). Os tipos de alteração hidrotermal dominantes descritos nos depósitos do QF são carbonatação, seguida de silicificação e sericitização (Vial, 2007). Ainda, segundo esse mesmo autor, a composição da rocha encaixante é mais influente no resultado do tipo de alteração do que a química do fluído; em sequências vulcânicas máficas, silicificação, sericitização e carbonatação se desenvolvem com mais facilidade, enquanto em rochas metassedimentares silicificação não é tão comum. Segundo Lobato (2001b) os minerais de alteração hidrotermal, contendo ouro associado, ocorrem em diversos tipos de estruturas; a) zonas de cisalhamento rúptil-dúctil superficiais; b) plano axial de clivagem; c) zonas de charneira; d) dobras em bainha; e) fraturas de clivagem; f) charutos irregulares; g) minério brechado; h) minério budinado em flanco de dobra.

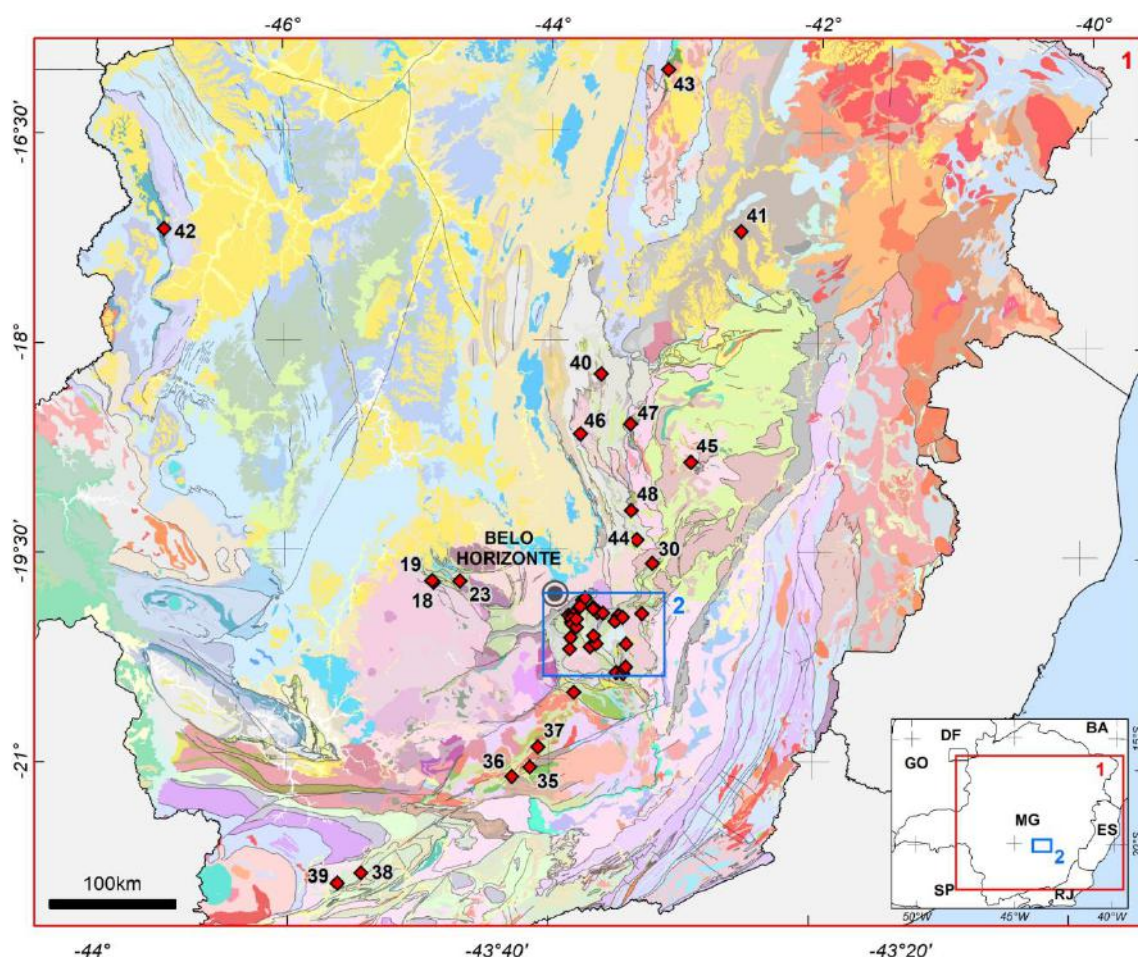


Figura 3: Mapa com as principais ocorrências de ouro em Minas Gerais. Os números são referentes a minas ativas ou inativas e escavações históricas. O número 19 representa o depósito de Turmalina, foco de estudo deste trabalho. Os números 18, 19 e 23 são de depósitos localizados no *Greenstone Belt* Pitangui. Retirado de <http://recursomineralmg.codemge.com.br/substancias-minerais/ouro/#ouro-em-minas-gerais> (acessado em 05/05/2019).

2.4. Depósito de ouro Turmalina

Turmalina é um depósito de ouro orogênico situado no *Greenstone Belt* Pitangui. Em 2016, o total de recursos de ouro medido e indicado no Projeto Turmalina foi de 540.000 oz com teor de 4,93 g/t Au (RPA Consultoria e Jaguar Mining Inc., 2017). O Complexo Turmalina compreende diferentes corpos mineralizados, ao longo do Lineamento Pitangui (A, B, C, D, Faina, Pontal e Zona Basal, ilustrados na figura 4. Essa particularidade reflete em maior variabilidade de rochas hospedeiras. Contrariamente a maioria dos depósitos de ouro do Quadrilátero Ferrífero, as rochas mineralizadas são, neste caso, metassedimentares, metavulcânica intermediária e metavulcanoclásticas. Destaca-se que o corpo D é uma continuação do corpo A e, o corpo C é conhecido também pelo nome Satinoco (referente à época que esse corpo era explorado em cava a céu aberto), dividindo-se entre as zonas C NW, C Central e C SE.

Os corpos mineralizados A, B, C e D se encontram no flanco invertido de uma dobra sinclinal reclinada invertida (figura 4). Segundo RPA Consultoria e Jaguar Mining Inc., 2017, a principal produção é do corpo A. A mineralização neste depósito se estende ao longo do strike por 250-300m e a profundidades de 1000m. O corpo B é composto por três lentes delgadas de menor teor, possuindo extensão de 350-400m ao longo do strike e atingindo profundidades de 900m. Já o corpo C é composto por uma série de 14 lentes, localizadas no *footwall* do corpo A e possuem normalmente um teor menor que em A. Até o ano de 2017, a produção nesse corpo tinha sido baixa, porém campanhas de sondagem mais atuais apontam para continuação do corpo de minério em maior profundidade. Neste corpo a mineralização ocorre ao longo de um strike de 800 a 850m e atinge profundidades de 400 a 450m abaixo da superfície. Os corpos de minério são controlados por zonas de cisalhamento de orientação NW-SE, associados com alteração hidrotermal. Segundo Fabrício-Silva et al. (2018), três eventos de deformação são reconhecidos para o depósito: D1 e D2 são o resultado de uma deformação arqueana progressiva sob condições dúcteis e D3 é caracterizado por um evento transpressional sob condições dúcteis-frágeis com a idade ainda incerta. A duração da deformação arqueana é limitada entre 2749 ± 7 (Hartmann et al. 2006; idade U-Pb do zircão detrítico mais novo, que limita a deposição do Grupo Nova Lima) e 2664 ± 35 Ma (Tassinari et al., 2015; granitoide intrusivo).

A fase final do evento deformacional arqueano (D2) produziu as estruturas responsáveis pelo controle das mineralizações de ouro. Durante essa fase, a foliação, continuamente desenvolvida, assume orientação NW-SE, com alto mergulho para NE e gera-se lineação de estiramento mineral com caimento para ESE. A direção de estiramento é definida por eixos de *boudins* e de estruturas tipo *pinch-and-swell* em veios, e a orientação dos corpos com alto teor de ouro acompanha a orientação desses veios (Fabrício-Silva et al., 2018).

O *timing* da mineralização é um tópico que ainda precisa ser melhor definido. Apesar de Fabrício-Silva et al., 2018 indicar que o metagranitóide Casquilho (pertencente a Suíte Mato Dentro) intrude as rochas do depósito, Tassinari et al., (2015) aponta uma idade paleoproterozoica para a mineralização, com base em datação de isótopos radioativos.

Dois estágios de mineralização foram identificados por Fabrício-Silva et al. (2018): pirrotita-arsenopirita \pm lollingita \pm calcopirita \pm ouro (estágio I) e pirrotita-pirita-arsenopirita \pm calcopirita \pm ouro (estágio II), sendo o primeiro estágio associado à altas temperaturas (~ 600 °C) e às estruturas D1, e o segundo à menores temperaturas (~ 450 °C) e estruturas D3. Segundo Lobato et al. (1998) e Lobato e Vieira (1998), a predominância de pirita sobre pirrotita é a principal diferença entre os depósitos de ouro nas faixas greenstone Rio das Velhas e Pitangui, com pirrotita sugerindo processos de maior temperatura e fluidos mais reduzidos (*apud* Brando Soares et al., 2018). Reativações tectônicas paleoproterozoicas (Orogenia Minas) de estruturas arqueanas foram descritas por Romano (2007) e Tassinari et al., 2015, o que, nesse sentido, pode sugerir uma evolução polifásica para o depósito Turmalina. A intrusão do Granito Casquilho, segundo Fabrício-Silva et al., 2018, potencialmente também contribuiu com a mineralização, a partir do imputo de fluidos magmáticos. Os fluidos hidrotermais, nessa região, geraram ao menos seis fácies de alteração hidrotermal, incluindo silicificação, cloritização, sericitização, carbonatação, turmalinização e sulfetação. De acordo com Tassinari et al. (2015), a origem dos fluidos mineralizantes é metamórfica, porém com uma fonte local (Grupo Pitangui) de metal. As reativações da Zona de Cisalhamento Pitangui teriam provocado a circulação de fluidos e a lixiviação das rochas do embasamento e da pilha vulcânica abaixo das rochas mineralizadas, adicionando, assim, metais aos fluidos.

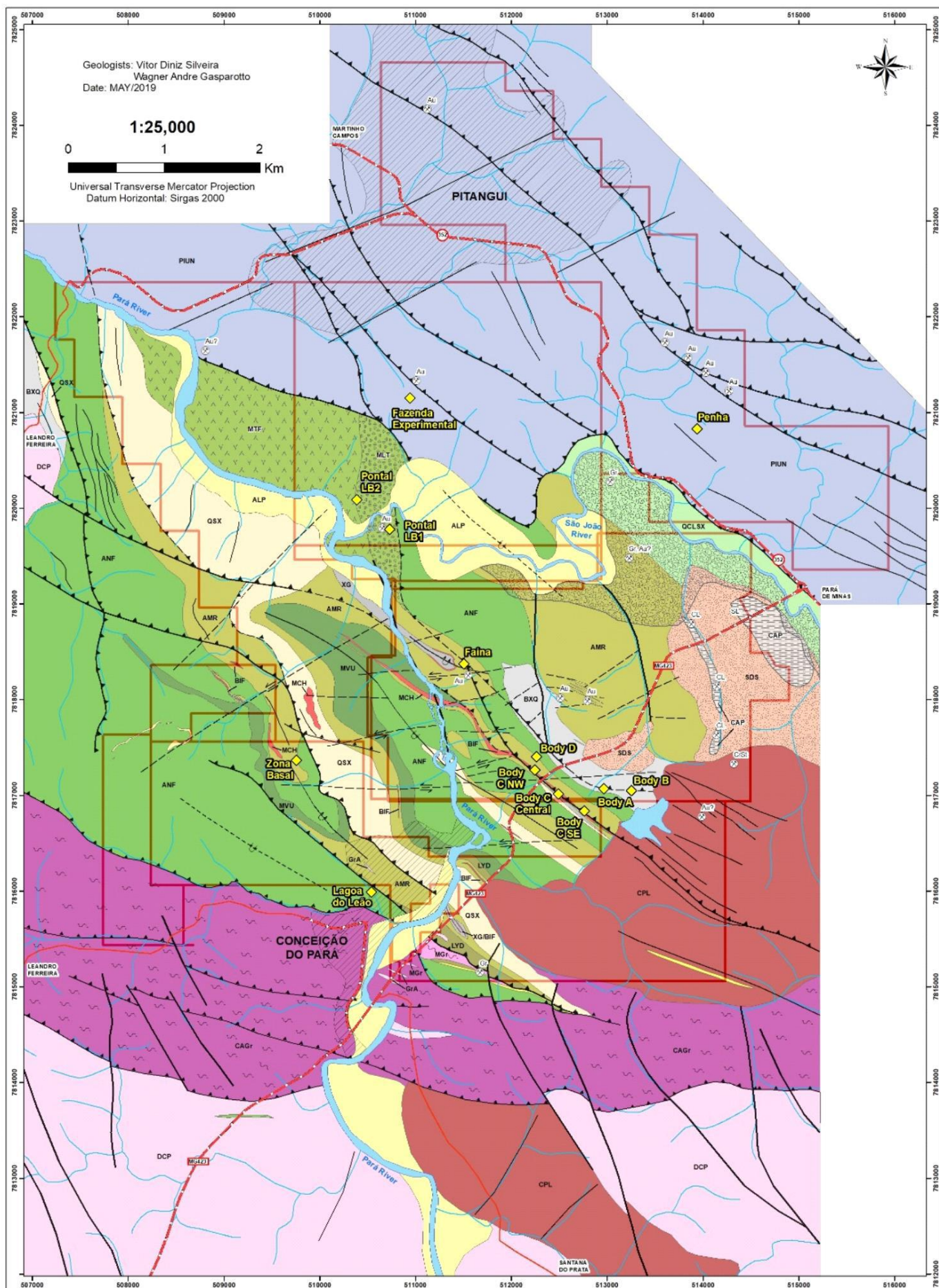




Figura 4: Mapa Geológico do Greenstone Belt Pitangui, com destaque para os depósitos do Complexo Turmalina. Esse mapa foi carinhosamente cedido pela MSOL.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. Trabalho de campo

A primeira etapa do trabalho ocorreu no Galpão de Exploração da Mina Turmalina da *Jaguar Mining*, localizada próxima a cidade de Conceição do Pará – MG, com duração total de 14 dias. A empresa disponibilizou seis furos de sondagens para o estudo (três furos representativos do Corpo A e três do Corpo C). Os furos do Corpo A descritos foram: FTS1555 (186m); FTS1653 (200.1m); FTS1657 (191.95m); totalizando 578m. Do Corpo C foram descritos: FTS1486 (240.3m); FTS1487 (241m); FTS1488 (227.4m); totalizando 708.7m. Dados de análise química para ouro, assim como descrição geológica e localização espacial desses furos foram fornecidos pela empresa.

A metodologia de descrição dos testemunhos consistiu no preenchimento de uma espécie planilha, com os seguintes tópicos: descrição mineralógica, descrição textural, descrição de tipo de alteração hidrotermal e intensidade, descrição de sulfetação e intensidade. Ressalta-se que a definição macroscópica das litologias do corpo A foi, basicamente, baseada na concentração de biotita. Além da descrição geológica dos furos de sondagem, foram selecionadas amostras para análises químicas multi-elementares e de rocha total. O total de dados coletados

corresponde a: 23 amostras para rocha total e 95 amostras para geoquímica multi-elementar. O levantamento de dados químicos foram custeados pela empresa.

Também foi realizada visita ao campo, durante dois dias, acompanhada do geólogo de exploração. Esse breve mapeamento foi feito com intuito de reconhecer, em afloramentos, as litologias do *Greenstone Belt* Pitangui, e relacioná-las com as camadas subterrâneas estudadas nesse trabalho. A figura 5 ilustra cavas antigas dos corpos A e C que foram visitadas.



Figura 5: Foto tirada durante trabalho de campo, do alto da pilha de rejeito da mina. Imagem mostra a extensão da zona mineralizada, com destaque para antigas cavas, dos corpos C, A e Faina.

3.2. Análise Geoquímica

3.2.1. Geoquímica multi-elementar

O pacote de geoquímica multi-elementar foi selecionado pela empresa em conjunto com o grupo de pesquisa afim de atender as demandas da mineradora. O laboratório ALS foi responsável pela execução das análises químicas. O código da análise multi-elementar foi ME-MS61, com exceção do ouro (AuAA23 e Au-GRA21) e os limites de detecção podem ser consultados em: alsglobal.com/services. A metodologia de amostragem contou com a seleção dos intervalos mineralizados, com teores maior ou igual a 1g/t de Au, com base em dados fornecidos pela empresa. Optou-se por adotar os mesmos intervalos de amostras utilizados pela Jaguar Mining em análise anterior. É importante destacar que, para os testemunhos de sondagem do Corpo A, não foi possível serrar as amostras para petrografia de minério, devido ao alto nível de alteração da rocha e à espessura mais fina dos furos. Sendo assim, estes intervalos específicos foram por inteiro selecionados apenas para petrografia e não puderam ser enviados para geoquímica multi-elementar. De todo modo, os teores de ouro indicados pela reanálise foram comparados com os da análise prévia, e não houve variação significativa. Foram selecionadas 48 amostras do Corpo A e 47 amostras do Corpo C. Os resultados foram encaminhados, em formato planilha, e englobam os seguintes elementos: Au, Ag, Al, As, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn, Zr. Ainda, de acordo com os resultados do laboratório, os elementos terras raras podem não ser totalmente solúveis neste método. As tabelas com os resultados dessas análises encontram-se no anexo 1, em outro documento.

3.2.2. Geoquímica de rocha total

A análise química foi realizada pelo mesmo laboratório, por preferência da Jaguar Mining. Os códigos de análise utilizados foram: ME-XRF26, OA-GRA05x, ME-MS81, ME-4ACD81, ME-MS42, S-IR08 e C-IR07; mais informações em alsglobal.com/services. Amostras de rocha total coletadas somam ao todo 23, sendo 10 referentes ao Corpo A e 13 ao Corpo C. A metodologia de amostragem buscou englobar todas as litologias

discriminadas durante a descrição dos furos, com exceção do granito intrusivo. Selecionou-se apenas amostras minimamente alteradas e deformadas, com aproximadamente 15cm de comprimento do testemunho. As tabelas com os dados dessas análises estão inseridas no anexo 1, separadas deste documento.

Esses dados foram, aqui, trabalhados apenas superficialmente, de modo apenas a indicar os protólitos. Tratamento mais profundo dos dados será objeto de estudos futuros. Através do R 3.4.1 e GCDkit 4.1, elaboraram-se diagramas de classificação, utilizando principalmente o modelo TAS Middlemost (1994) para rochas vulcânicas, diagrama *spider* para comparar as rochas metavulcânicas máficas de ambos os corpos.

Ademais, geraram-se diagramas tipo *Harker*, com Zr fixado no eixo x. Esse elemento foi selecionado por ser considerado imóvel durante metamorfismo e alterações, além de possuir alta concentração em rochas ígneas, devido processos de fusão parcial e cristalização fracionada. A elaboração desses diagramas foi baseada no trabalho de Furnes et al., 2013, que engloba estudo de rochas máficas e félsicas arqueanas. Aplicou-se os seguintes filtros nos dados, para evitar amostras mais alteradas: $55\% > \text{SiO}_2 > 45\%$; $\text{MgO} > 3\%$; $\text{CaO} > 5\%$; $\text{LOI} < 5\%$. Por conta disso, 7 amostras foram eliminadas, e das outras 16, optou-se por não utilizar a amostra FTS-1486 (ACX1; 238m), por sua concentração em Zr ser muito superior a das outras amostras. Ressalta-se que amostras correspondentes ao intervalo metassedimentar não foram abordadas nessas análises.

3.3. Modelamento Geológico Simplificado

O modelamento geológico 3D foi realizado utilizando o software *Leapfrog Geo* 4.5. Foram elaborados três modelos; um para o corpo A, outro para o C, e um modelo conjugado. Utilizaram-se para o modelo apenas os furos descritos neste trabalho, totalizando seis testemunhos. Os dados de posicionamento espacial dos furos de sondagem foram fornecidos pela empresa e os dados litológicos utilizados foram os obtidos com a descrição dos testemunhos, durante a campanha de campo. Dada a ausência de dados estruturais, utilizou-se como referência a média da foliação principal, descrita no trabalho de Fabrício-Silva et al. (2018).

Além do modelo geológico, foi elaborado o modelamento do corpo de minério de ouro e para zonas com enriquecimento em prata. Os dados utilizados foram os obtidos com as análises geoquímicas multi-elementares. Além do ouro, que é a *commodity* principal, a prata foi selecionada pois apresentou boa correlação com Au nos resultados de diagramas binários, em ambos os corpos estudados. As classes de teores para ouro foram definidas com base em teores econômicos; <1,0g/t Au; 1,0<g/t Au<5,0; >5,0 g/t Au. No caso da prata, foram utilizados intervalos de teores sugeridos pelo programa *Leapfrog Geo 4.5*.

4. RESULTADOS

4.1. Descrição de testemunhos e estratigrafia

4.1.1. Corpo C

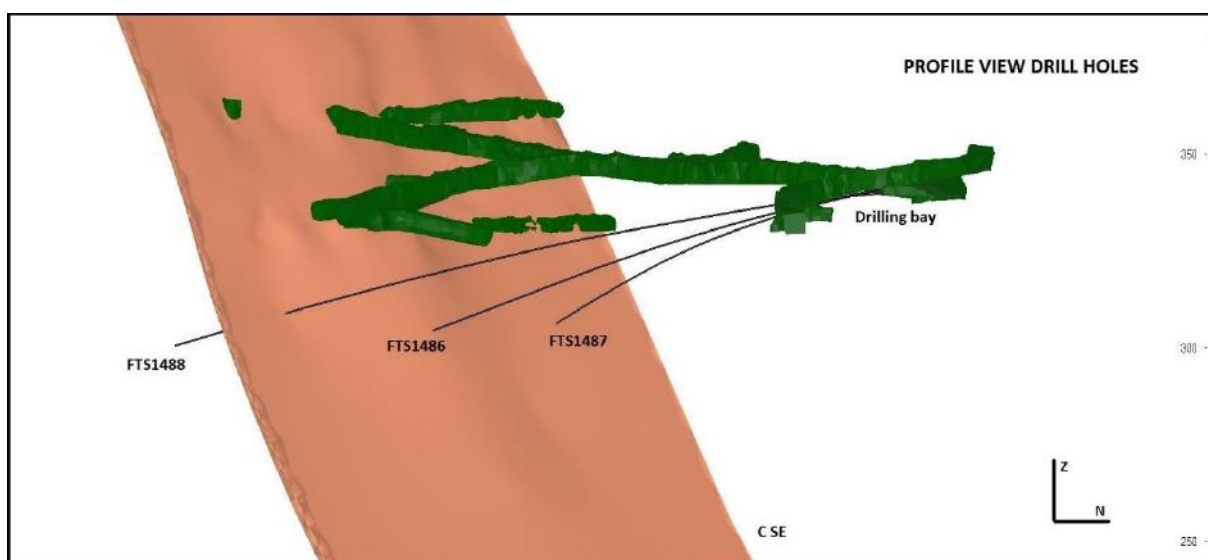


Figura 6: Visualização 3D das galerias e furos de sondagem do corpo C que serão analisados neste trabalho. Imagem fornecida pela Jaguar Mining.

A disposição espacial dos furos do corpo C podem ser visualizadas na figura 6. As litologias desse corpo constituem um conjunto metavulcano-sedimentar (Figura 7). Segundo Fabricio-Silva et al. (2018) as assembleias minerais, tanto da unidade máfica-ultramáfica quanto da unidade vulcano-sedimentar, indicam condições metamórficas em fácies anfibolito. Da base para o topo encontram-se andesitos (Actinolita clorita xisto 1), observados apenas no furo FTS1486. Em seguida ocorrem rochas de protólito sedimentar (Quartzo clorita xisto, xisto grafitoso) intercaladas com outras de natureza vulcânica (Tufo vulcânico). Alguns níveis desse intervalo podem ser considerados *chert*. Os níveis de metatufo e xisto grafitoso possuem em torno de 2 metros de espessura, enquanto o quartzo clorita xisto se estende por cerca de 90 metros.

Os 100 metros finais são compostos por basaltos e basaltos andesíticos (Actinolita clorita xisto 2, Actinolita clorita xisto 2 porfirítico).

O contato entre as rochas metavulcano-sedimentares e metavulcânicas máficas é marcada por lentes descontínuas entre rochas que possuem variações composicionais (QCX e CQX). Em contrapartida, os níveis de metatufos e xisto grafitoso, em especial o primeiro, formam lentes delgadas e contínuas. Níveis com ocorrência de minerais, possivelmente metamórficos, como granada e estauroлита também puderam ser correlacionados entre os furos. Ademais, ressalta-se que muitas estruturas como dobras, falhas normais e reversas foram observadas durante a descrição, mas não puderam ser coletadas medidas, pois os furos não são orientados.

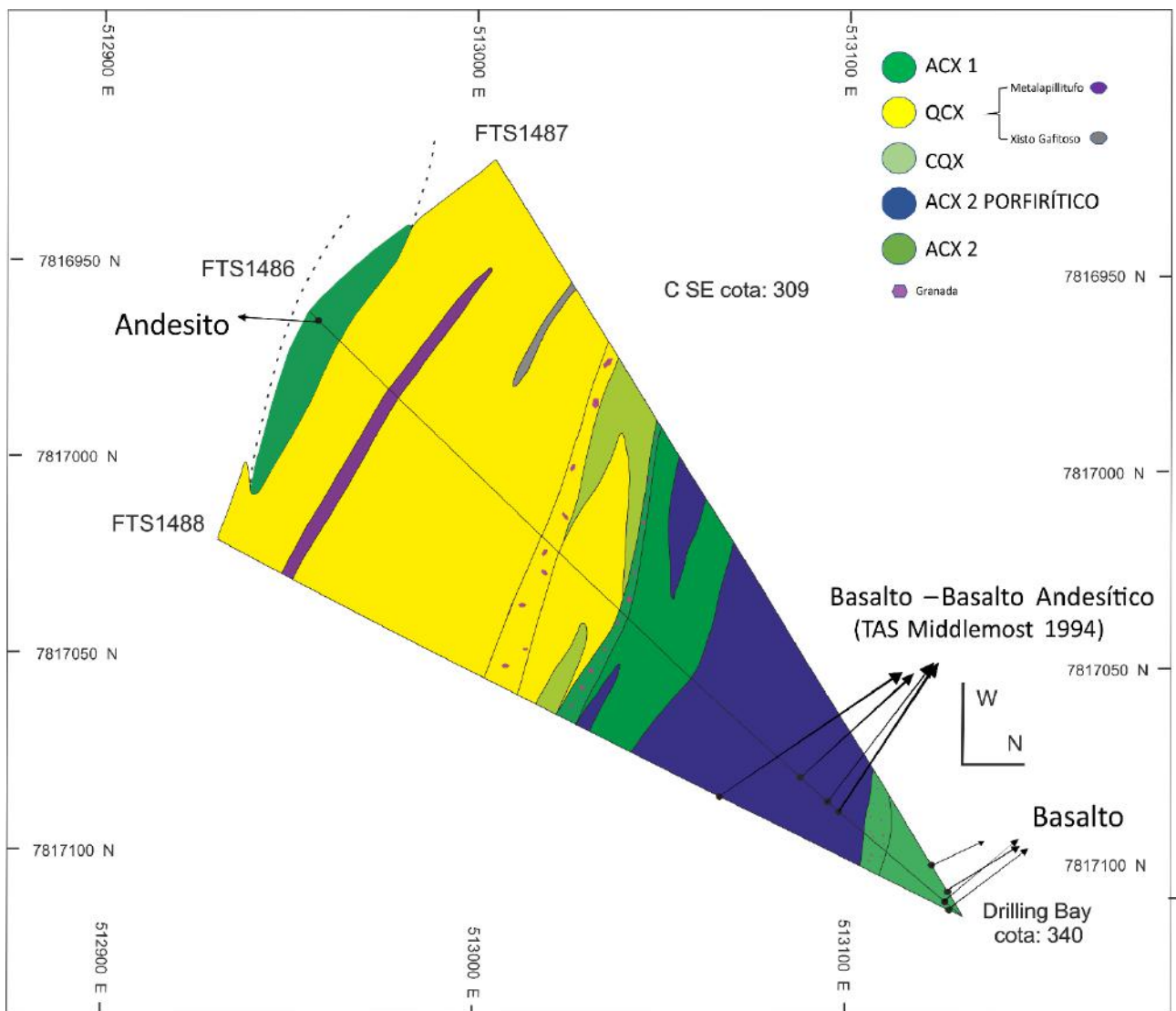


Figura 7: Seção horizontal dos testemunhos descritos do corpo C (FTS1486, FTS1488, FTS1487). (ACX=Actinolita Clorita Xisto; CQX=Clorita Quartzo Xisto; QCX=Quartzo Clorita Xisto). Os pontos pretos são referentes as amostras de geoquímica de rocha total. As setas indicam os resultados litológico obtidos a partir do diagrama TAS (Middlemost, 1994)

- **Actinolita** **clorita** **xisto** (metavulcânica máfica): litologia composta por clorita (~55%), biotita (~20%), plagioclásio (~5%), quartzo (~5%) e actinolita (~10%). A estrutura da rocha vai de foliada (figura 8,a), intensamente ou não, a maciça. Localmente ocorre bandamento. Apresenta texturas fanerítica, porfirítica ou afanítica. Em casos, onde a deformação é mais fraca, evidencia-se caráter porfirítico do protólito ígneo, por fenocristais de plagioclásio euédrico ou não (figura 8,b). Onde há xistosidade, os minerais que compõe a foliação são clorita e biotita e actinolita. Este último também ocorre com hábito acicular, fino, e disseminado na rocha. Brechas incipientes ocorrem localmente. Dobras e falhas, tanto reversas e normais, são comumente observadas.

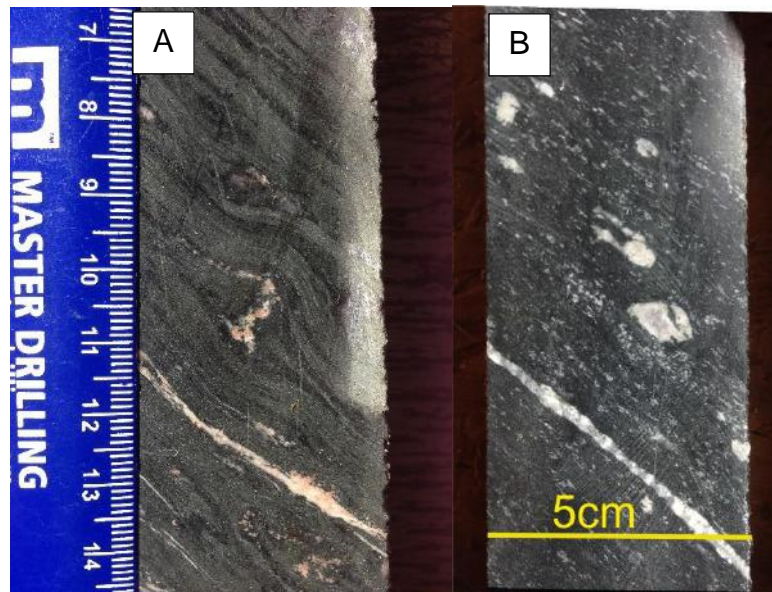


Figura 8: (a) Metabasalto foliado; (b) Metabasato porfirítico

- **Clorita** **quartzo** **xisto** (metassedimentar clástica): rocha composta por clorita (~40%), quartzo (~35%), sericita (~5%), biotita (15%), feldspato (~5%). Rocha apresenta xistosidade bem evidente, formada por planos de clorita, biotita e quartzo. Bandamento composicional é comum, com intercalações de bandas mais ricas em quartzo ou mica, e em diferentes espessuras, remetendo caráter de deposição sedimentar. A foliação Sn pode estar crenulada (figura 9).



Figura 9: Amostra de clorita quartzo xisto crenulado. Intercalações entre bandas ricas em quartzo e ricas em mica.

- **Quartzo clorita xisto** (metassedimentar clástica): rocha similar ao clorita quartzo xisto, porém com maior conteúdo de quartzo; clorita (~25%), quartzo (~50%), sericita (~10%), biotita (~10%), feldspato (~5%). O bandamento composicional é comum, apresentando intercalações de caráter sedimentar, com bandas com conteúdo maior de quartzo ou mica.
- **Xisto carbonoso** (metapelito carbonoso): Essa rocha foi reconhecida pela tonalidade negra, devido ao alto conteúdo de carbono. Devido a sua composição, normalmente essa litologia provoca a quebra do testemunho de sondagem, o que facilita seu reconhecimento.
- **Lapillitufo** (metavulcanoclástica): clastos líticos, de rochas provavelmente vulcânicas intermediárias, arredondados em meio à uma matriz fina e cloritizada (figura 10). Sulfetos ocorrem como acessórios. Localiza-se em meio a rochas metassedimentares. Essa rocha aparece mais ou menos deformada e, em casos que os litoclastos estão muito estirados, torna-se mais difícil sua identificação.

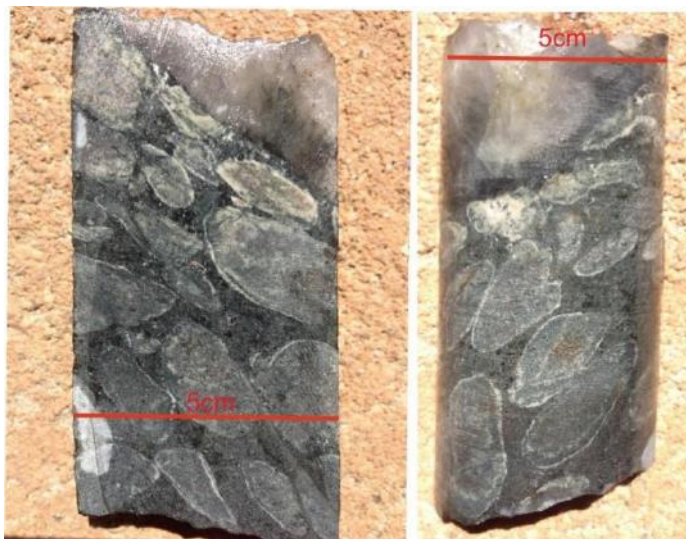


Figura 10: Amostra de metatufo cortado por veio de quartzo. Furo FTS-1486 (Corpo C).

Mineralização

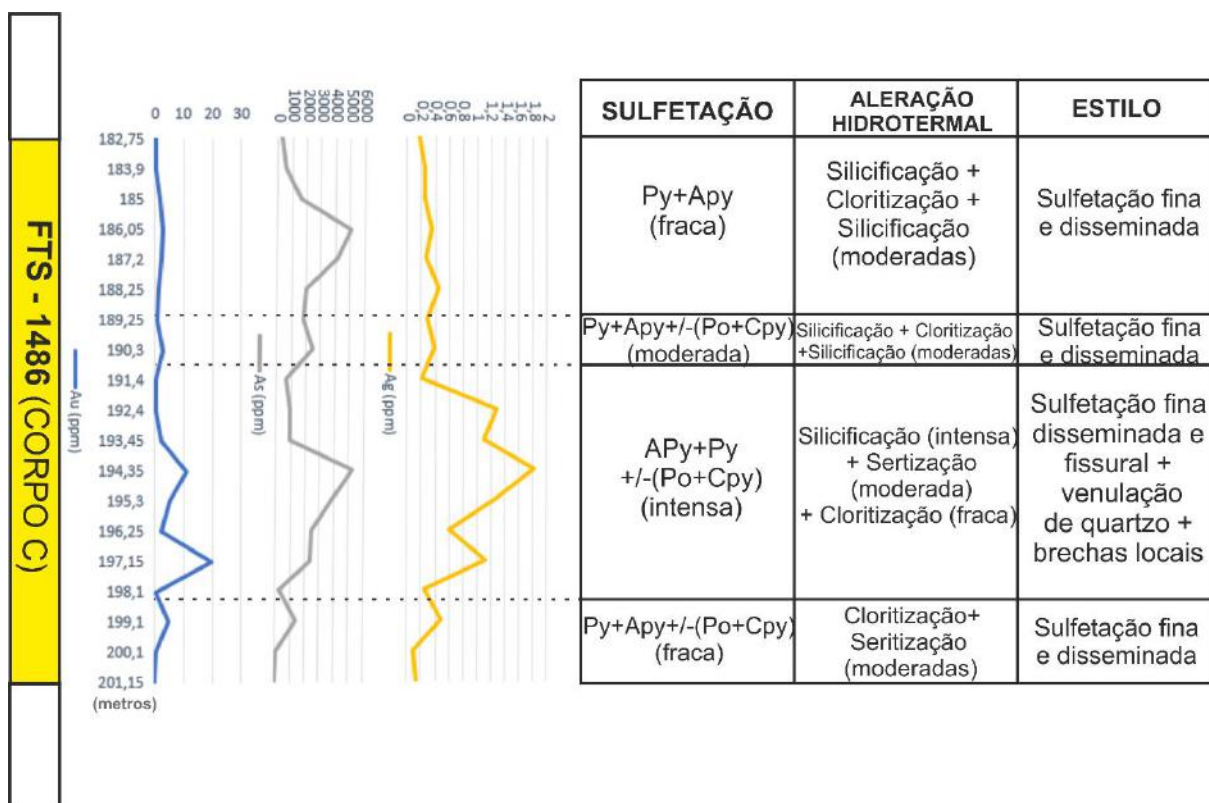


Figura 11: A imagem retrata a zona mineralizada do furo FTS-1486, corpo C. O gráficos são de valores de ouro (azul), arsênio (cinza) e prata (amarelo). A tabela ao lado mostra, para cada intervalo selecionado, os tipos de sulfetos e intensidade de ocorrência; tipos e intensidade de alteração hidrotermal; estilo de mineralização. (Py=pirita; Apy=arsenopirita; Po=pirrotita; Cpy=calcopirita).

A rocha que hospeda a mineralização do corpo C é o quartzo clorita xisto. Essa é uma rocha metassedimentar que faz parte de um conjunto metavulcano-sedimentar, no qual o corpo de minério ocorre exatamente entre os níveis de metalapillitufos e xisto carbonoso (Figura 13). A mineralização nesse nível ocorre associada à sulfetação principalmente de arsenopirita, seguida de pirrotita, pirita e calcopirita (figuras 11 e 12). Texturas de brecha são localmente observadas, no corpo C. Nestes casos, a pirrotita ocorre com maior concentração e os sulfetos apresentam estrutura maciça na matriz da brecha (figura 12, c). Entretanto, mais comum é o ouro associado a sulfetação fina e disseminada ao longo da foliação e/ou fissural. Veios de quartzo, fumê ou leitoso ou transparente, são comuns e, estão associados a altos teores de ouro. Dentre os tipos de alteração hidrotermal observados, destacam-se: cloritização, sericitização, carbonatação e silicificação. Em especial, este último, ocorre, em alguns casos, associado a altos teores de minério.

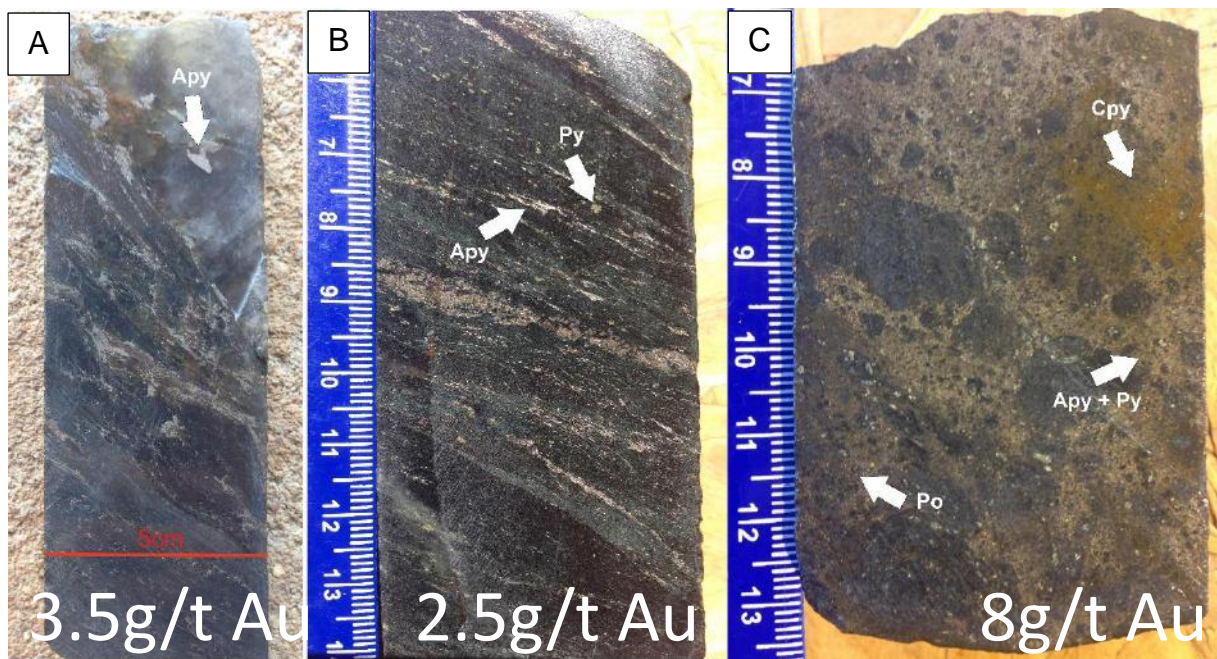


Figura 12: a) amostra do furo FTS-1486, minério de alto teor associado a veio de quartzo; b) sulfetação fina e disseminada em minério de alto teor, Furo FTS-1486; c) textura de brecha em minério de alto teor (Furo FTS-1488). Teores de ouro das amostras estão indicados no canto inferior das imagens.

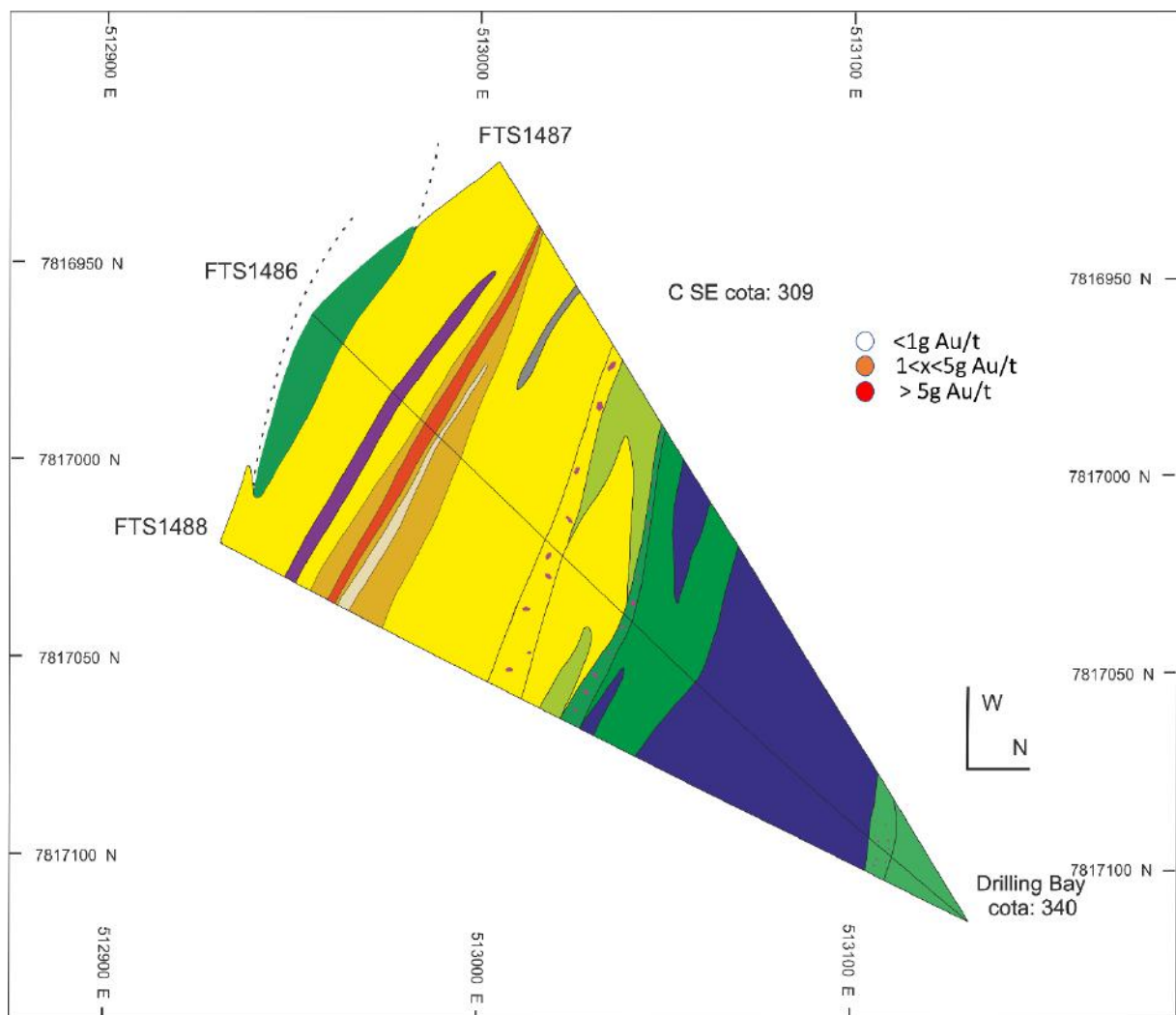


Figura 13: Seção horizontal do corpo C com corpo de minério (Furos FTS1486, FTS1488, FTS1487).

4.1.2. Corpo A

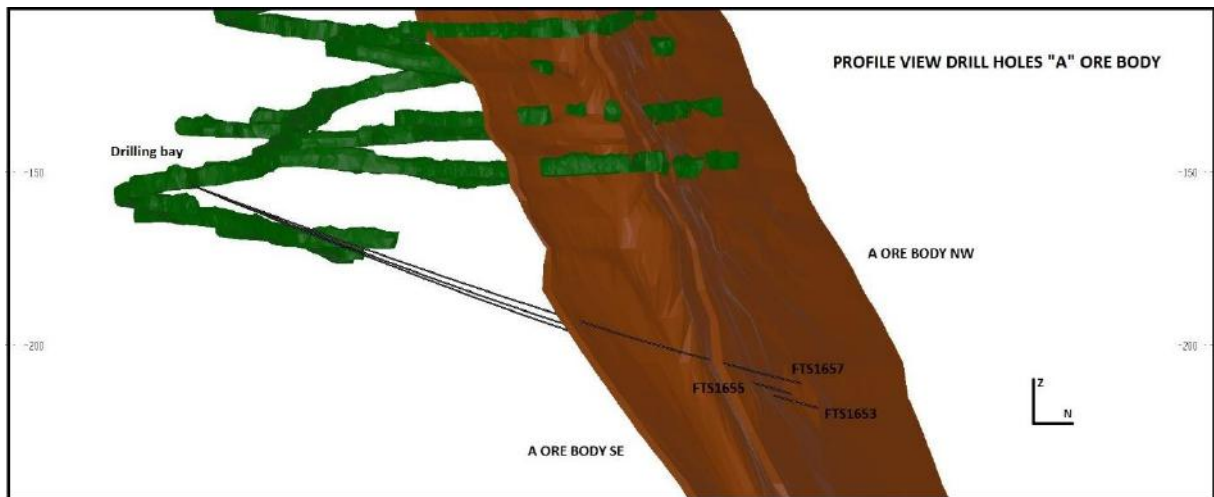
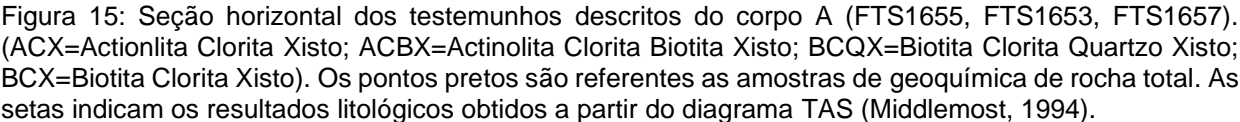


Figura 14: Visualização 3D das galerias e furos de sondagem do corpo A que serão analisados neste trabalho. Imagem fornecida pela Jaguar Mining.



25

espessuras das apófises variam de 10cm a 6m, sendo representadas na seção apenas as mais espessas. Enquanto actinolita clorita biotita xisto (beje) sofre espessamento em direção ao furo FTS1653, o biotita clorita quartzo xisto (amarelo) sofre adelgaçamento nesse sentido. O biotita clorita xisto está restrito aos furos FTS1653 e FTS1655. Vale destacar que neste alvo de estudo não foram observadas rochas de origem sedimentar.

- **Actinolita clorita xisto** (metavulcânica máfica): rocha é macroscopicamente muito semelhante aos metabasaltos do corpo C, podendo apresentar maior concentração de biotita em relação àquela. A cor é verde e é composta por clorita (~45%), biotita (~30%), plagioclásio (~10%), quartzo (~5%) e actinolita (~10%). A estrutura é maciça, ocorrendo zonas mais deformadas com xistosidade evidente. Localmente ocorre bandamento. Clorita, biotita e actinolita compõe a foliação. Este último também ocorre com formato acicular, fino, e disseminado na rocha. Brechas incipientes ocorrem localmente.

- **Biotita clorita quartzo xisto:** rocha de coloração cinza esverdeada. Composta por clorita (~30%), biotita (~40%), quartzo (~15%), sericita (10%), e feldspato (~5%). Em comparação ao actinolita clorita biotita xisto surgem bandas de quartzo e cristais de actinolita não são mais observados. Na figura 14, observa-se uma amostra dobrada dessa litologia.

- **Biotita clorita xisto:** rocha de coloração preta. Em comparação as outras litologias, essa exhibe as maiores concentrações de biotita. Composta por clorita (~25%), biotita (~65%), quartzo (~15%) e feldspato (~5%).

- **Granito:** ocorre na forma de apófises, sendo a maioria em torno de 30cm de espessura, mas podendo chegar a 8 metros. Rocha leucocrática, apresenta, comumente, granulação grossa, sendo composta de quartzo (~50%), feldspato (~25%) e biotita e muscovita (~25%) (figura 15).



Figura 16: Amostra de biotita clorita quartzo xisto dobrado.



Figura 17: amostra da apófise de granito, em FTS-1655.

Mineralização

A figura 18 ilustra a mineralização do corpo A, a partir do furo FTS-1655, onde são relacionados os teores de Au, As, Ag e características texturais da mineralização, sulfetos e alteração hidrotermal. A mineralização deste depósito

está majoritariamente hospedada por rochas vulcânicas intermediárias (biotita clorita quartzo xisto), ocorrendo enriquecimentos praticamente desprezíveis, do ponto de vista econômico nas rochas máficas também. Além disso, o corpo de minério encontra-se segmentado pelas apófises graníticas (figura 19). As características macroscópicas das zonas mineralizadas são de um minério com sulfetação muito fina e disseminada ao longo da foliação (figura 20). As associações de sulfetos mais comuns nesse depósito são, em ordem de maior concentração, de arsenopirita, pirita e pirrotita, ocorrendo pouca calcopirita, o que é evidenciado também pela correlação entre os picos de Au e As, na figura 18. Veios de quartzo, fumê ou leitoso ou transparente, são comuns e, estão associados a altos teores de ouro. Minerais de possível origem metamórfica, como granada e estaurolita ocorrem associados a parte dos intervalos mineralizados. Dentre os tipos de alteração hidrotermal observados, cloritização e silicificação estão frequentemente associados a intervalos mineralizados.

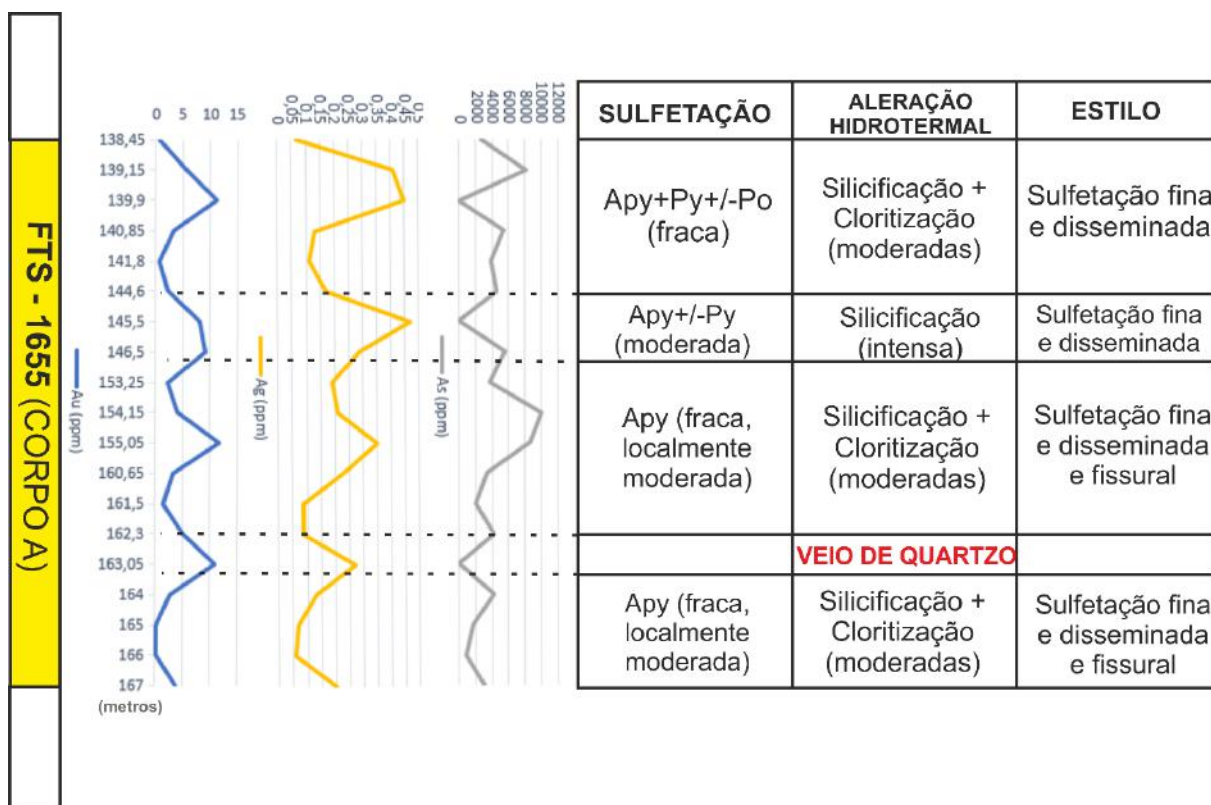


Figura 18: A imagem retrata a zona mineralizada do furo FTS-1655, Corpo A. O gráfico são de valores de ouro (azul), arsênio (cinza) e prata (amarelo). A tabela ao lado mostra, para cada intervalo selecionado, os tipos de sulfetos e intensidade de ocorrência; tipos e intensidade de alteração hidrotermal; estilo de mineralização. (Py=pirita; Apy=arsenopirita; Po=pirrotita; Cpy=calcopirita).

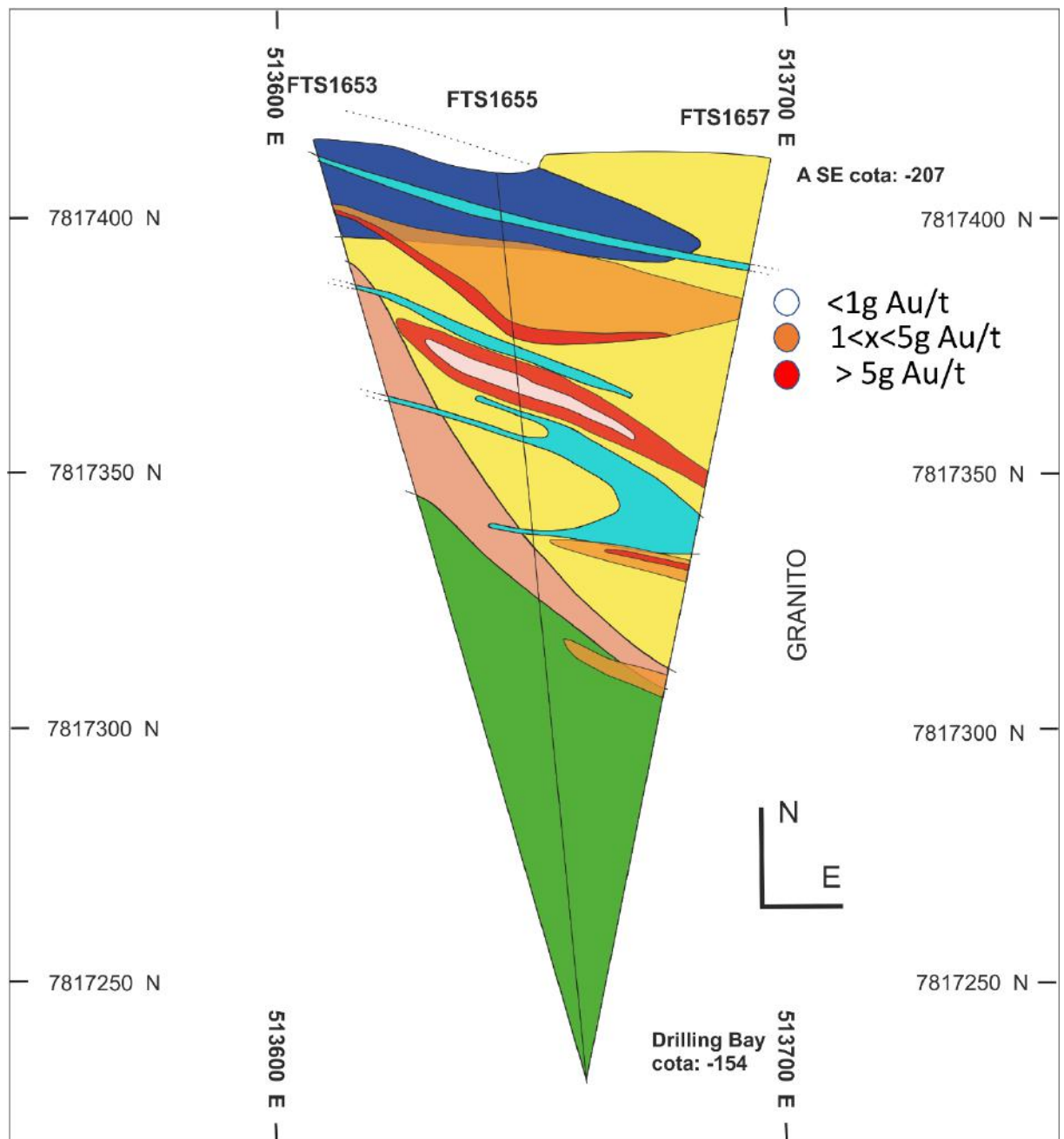


Figura 19: Seção horizontal do corpo A com corpo de minério (Furos FTS1653, FTS1655, FTS1657).

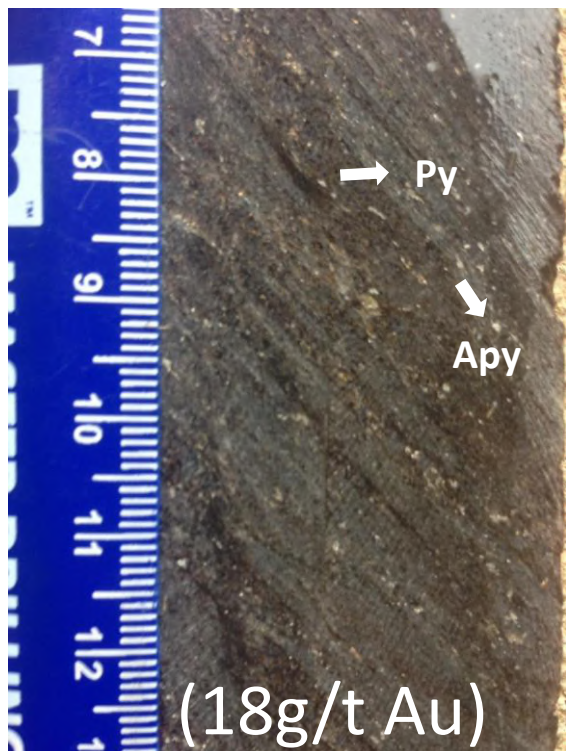


Figura 20: amostra representativa de zona de alto teor, com sulfetação fina e disseminada, de principalmente arsenopirita (FTS-1657). Teor de ouro da amostra está indicado no canto inferior da imagem.

4.2. Geoquímica de Rocha Total

TAS Middlemost 1994

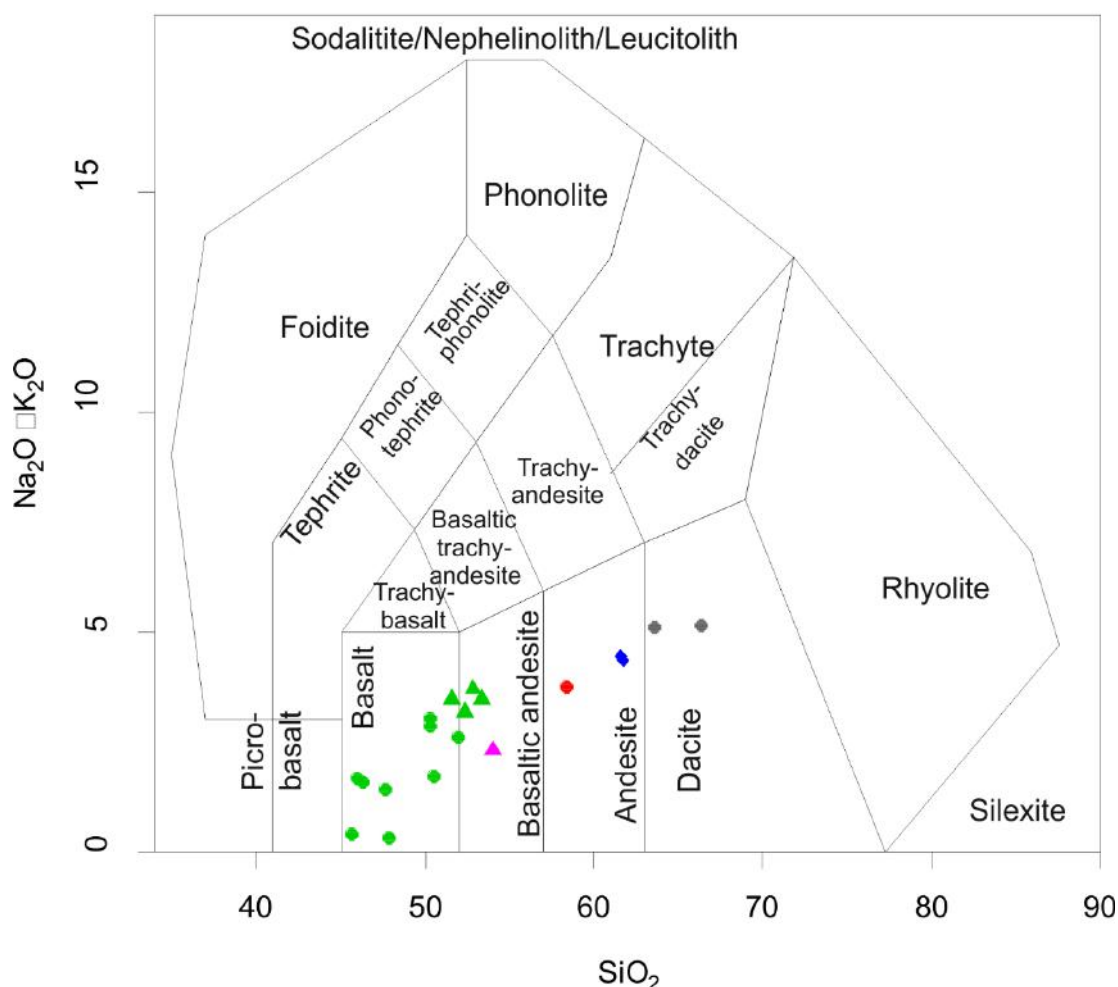


Figura 21: Diagrama TAS (Middlemost 1994) de $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ por SiO_2 . (● = Actinolita clorita xisto 2; ▲ = Actinolita clorita xisto porfirítico; ◆ = Biotita clorita xisto; ▲ = Actinolita clorita biotita xisto; ● = Actinolita clorita xisto 1; ● = Biotita clorita quartzo xisto).

A figura 21 mostra que as amostras actinolita clorita xisto, de coloração verde, correspondem a metabasaltos. As porções porfíricas dessa litologia são representadas por triângulos que plotam na interseção basalto-andesito basáltico. A rocha descrita como actinolita clorita xisto 1 (ponto vermelho no diagrama TAS, figura 19) é um andesito. Comparando diagramas *spider* para o conjunto de rochas máficas dos corpos A e C (Figura 22), observa-se a existência de um padrão *flat* para o corpo C e um leve fracionamento de terras raras leves em relação aos pesados no corpo A. O actinolita clorita biotita xisto plota no campo

de andesito basáltico, enquanto biotita clorita quartzo xisto é um metadacito.

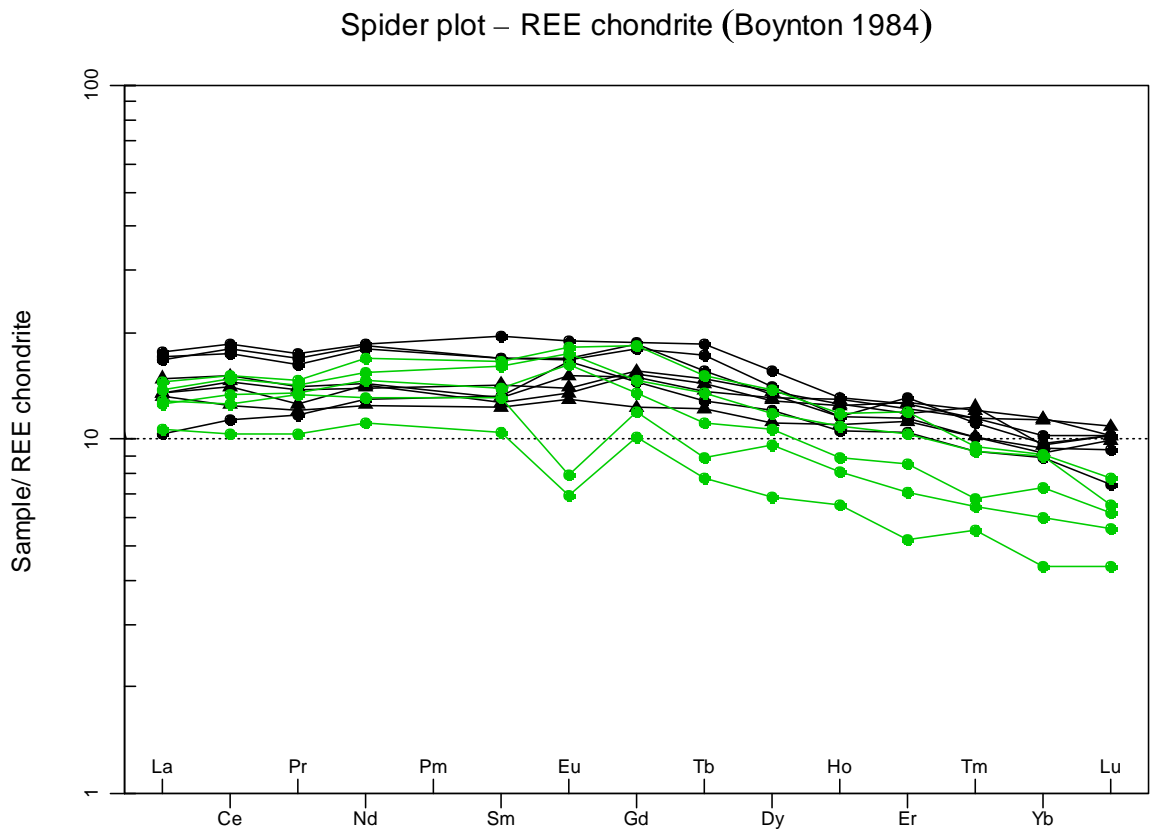


Figura 22: Diagrama *spider*, normalizado para elementos terras raras do condrito (Boynton 1984). Análise dos corpos C (preto) e A (verde).

Na figura 23, observa-se uma tabela com diagramas de Zr versus TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 (elementos maiores pouco móveis), FeO e MgO (elementos maiores móveis), Cr e Ni (elementos traço conservativos) e Y. Após a filtragem dos dados, segundo critérios de Furnes et al., 2013, do corpo C permaneceram 8 amostras de metabasalto. No corpo A, as amostras referentes a metaandesitos e metadacitos tiveram que ser excluídas da análise, restando 4 amostras de metabasalto e uma de metaandesito basáltico.

Do conjunto de diagramas tipo *Harker*, as amostras de rochas metavulcânicas máficas, dos corpos A e C, e de andesito-basáltico, do corpo A, compõe um mesmo *trend*. Dos diagramas Zr- TiO_2 , Zr-Y e Zr- Al_2O_3 , observa-se correlação positiva entre as amostras. No diagrama de Zr- P_2O_5 , apesar de apresentar problemas de detecção, observa-se também *trend*

positivo. FeOt se trata de elemento variavelmente móvel durante alteração, e, neste caso, mostra tendência a comportamento positivo em relação ao Zr. Cr, Ni e MgO possuem padrão disperso, com possíveis *trends* negativos, e são mais concentrados no corpo A.

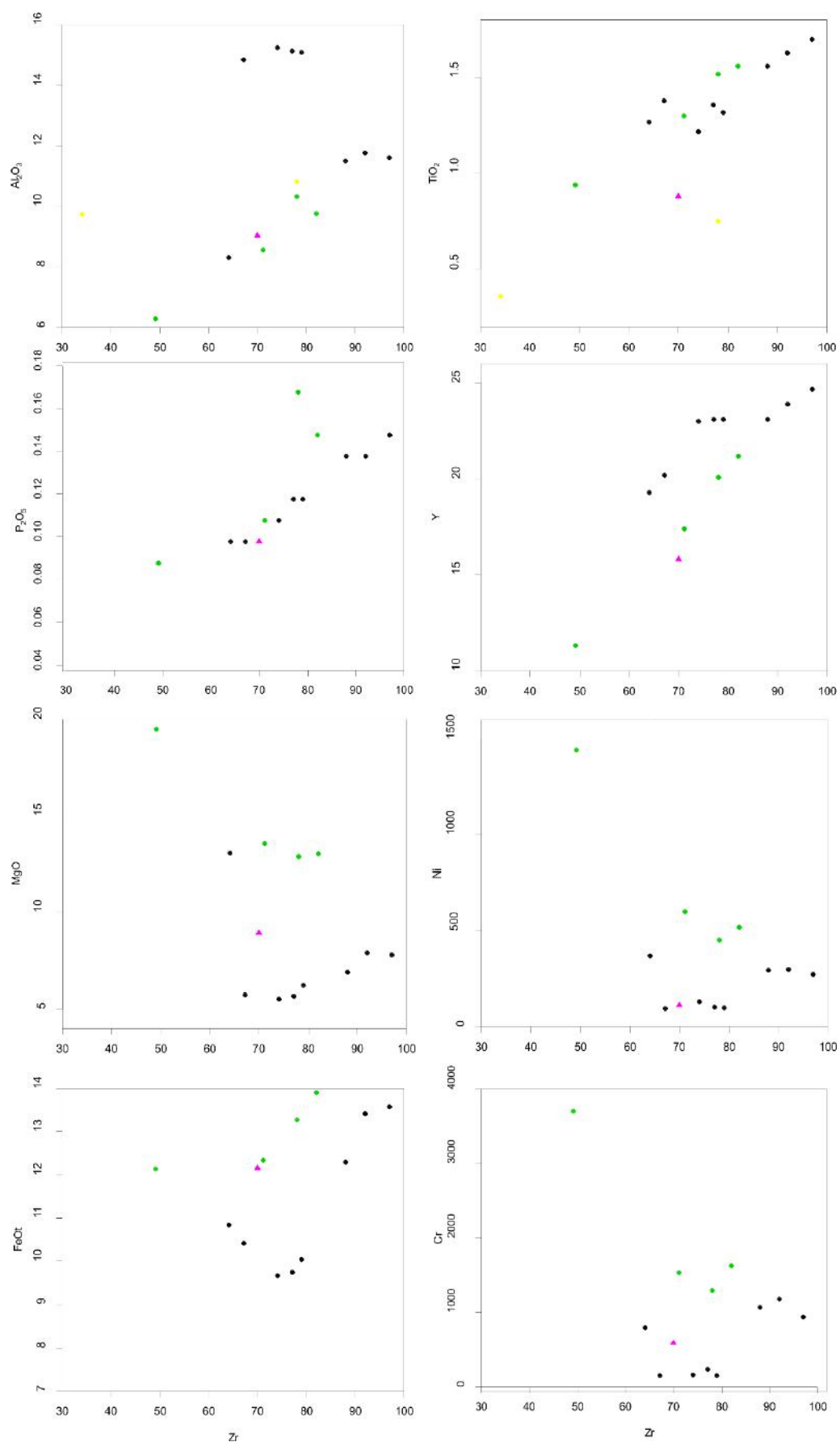


Figura 23: Diagramas tipo harker. (Metabasaltos-corpo C (preto); metabasaltos-corpo A (verde); andesito basáltico-corpo A (roxo)). Mostra-se as variações de TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 (elementos maiores pouco móveis), FeOt e MgO (elementos maiores móveis), Cr e Ni (elementos traço conservativos) e Y versus Zr.

4.3. Geoquímica Multi-elementar

As análises geoquímicas englobaram 42 elementos, que foram correlacionados com as concentrações de ouro. Neste documento foram incorporados apenas alguns dos diagramas analisados (Figura 24), que ilustram bem as diferenças e semelhanças entre as associações metálicas dos corpos A e C. Correlação de Au com As, Ag, Bi, S é positiva para ambos os corpos, sendo o corpo C mais rico em Ag e S que o corpo A. Cu e Co apresentam valores variados, porém mostram tendência positiva para o corpo C, sendo no geral mais ricos nesse corpo também. Te e Zn apresentam, em C, maiores concentrações e correlação positiva com Au, enquanto para o corpo A as concentrações são baixas e não há *trend*.

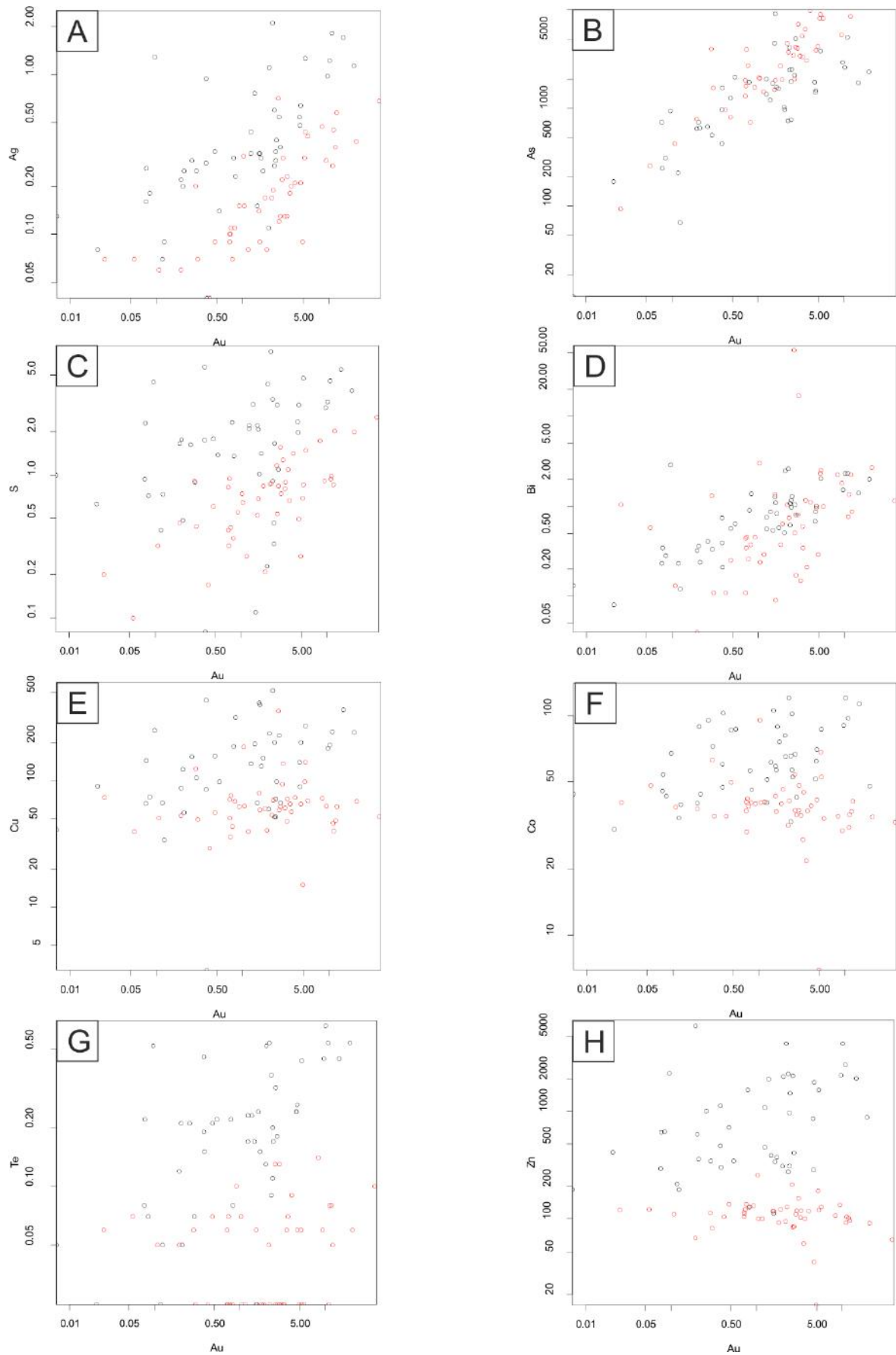


Figura 24: : Diagrama logarítmico de variação de elementos para os corpos mineralizados A (vermelho) e C (preto). As análises mostram correlação positiva de Au com As, Ag, Bi, S, para ambos os corpos, sendo o corpo C mais rico em Ag e S que o corpo A. Cu e Co apresentam valores variados, porém mostram tendência positiva para o corpo C, sendo no geral mais ricos nesse corpo também. Te e Zn apresentam, em C, maiores concentrações e correlação positiva com Au, enquanto para o corpo A as concentrações são baixas e não há *trend*.

4.4. Modelo Geológico Simplificado

Os modelos 3D simplificados foram realizados da seguinte maneira: i) inserção de dados espaciais, litológicos e químicos no software; ii) criação de modelo geológico, a partir das indicações da estratigrafia, em ordem cronológica, e dos *trends* estruturais; iii) por fim, após o *Leapfrog Geo* ter criado os volumes, as superfícies foram editadas manualmente. As edições ocorreram no formato, continuidade e relações de corte entre as diferentes superfícies. Essas alterações foram feitas com base no conhecimento adquirido a partir da interpretação das seções horizontais e em informações mais específicas dos corpos de minério, divulgadas no RPA Consultoria e Jaguar Mining Inc., 2017. Portanto, o software gerou o modelo, que por sua vez, foi refinado, a partir de edições manuais.

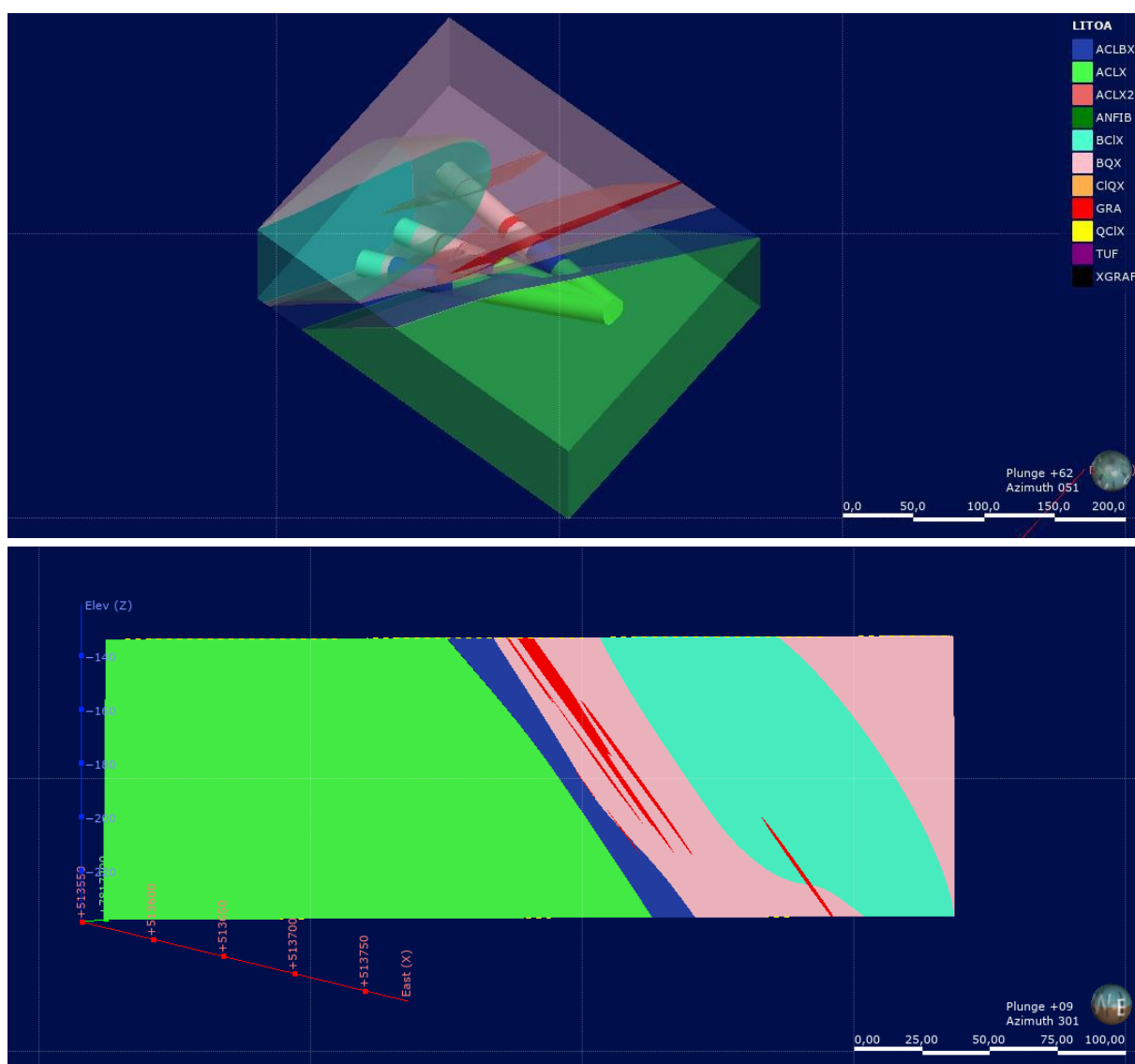


Figura 25: a) Modelo geológico simplificado do corpo A, a partir da descrição dos furos FTS-1655, FTS-1653 e FTS-1657. (Verde=actinolita clorita xisto (metabasalto); azul escuro=actinolita clorita

biotita xisto (metaandesito basáltico); rosa=biotita clorita quartzo xisto (metadacito); azul claro=biotita clorita xisto (metaandesito); vermelho=metagranitoide). b) Seção vertical do corpo A.

Na figura 25, observa-se a estratigrafia do corpo A, composta, da base ao topo, por conjunto de metabasaltos, seguido de metaandesito basáltico, metaandesitos e metadacitos. O contato do Granito Casquilho com as rochas mineralizadas ocorre em forma de apófises que truncam a foliação, de forma levemente oblíqua. Como a espessura dos intervalos de metagranitoide estudados é muito delgada, no modelo, tornou-se difícil a visualização clara do comportamento intrusivo.

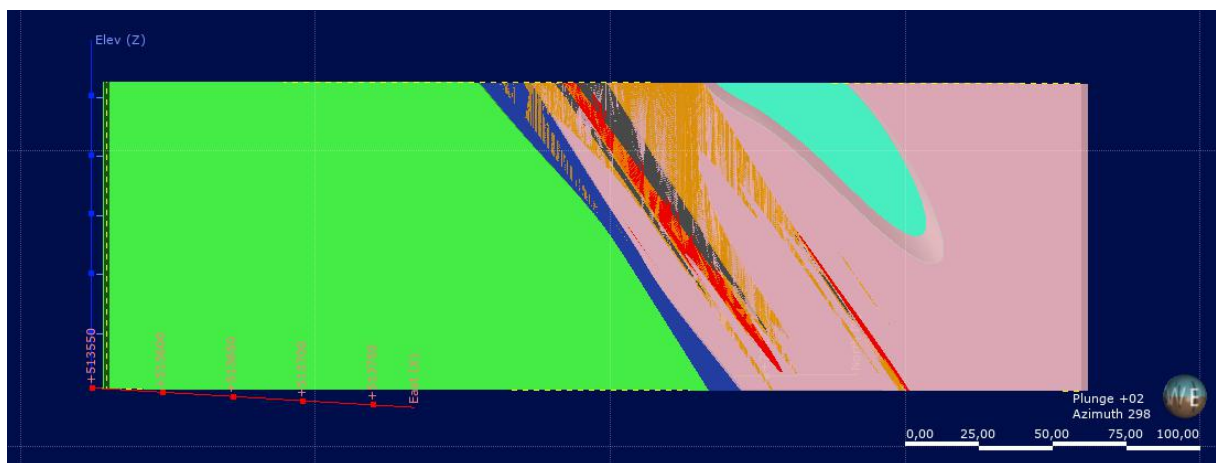


Figura 26: Seção vertical do modelo litológico com modelo do corpo de minério (Au) sobreposto. As cores cinza e laranja representam as classes de ouro definidas; respectivamente, de alto teor (>5 g/t) e teor médio (1-5 g/t).

A figura 26 mostra o corpo de minério sobreposto ao modelo litológico. Os “traços”, com aspecto de erro, ocorrem por conta da interseção entre *wireframe* dos modelos. Nessa imagem é possível observar como é persistente a continuidade do corpo de minério ao longo do mergulho das camadas. Além disso, os altos teores de ouro ocorrem nas adjacências das intrusões graníticas.

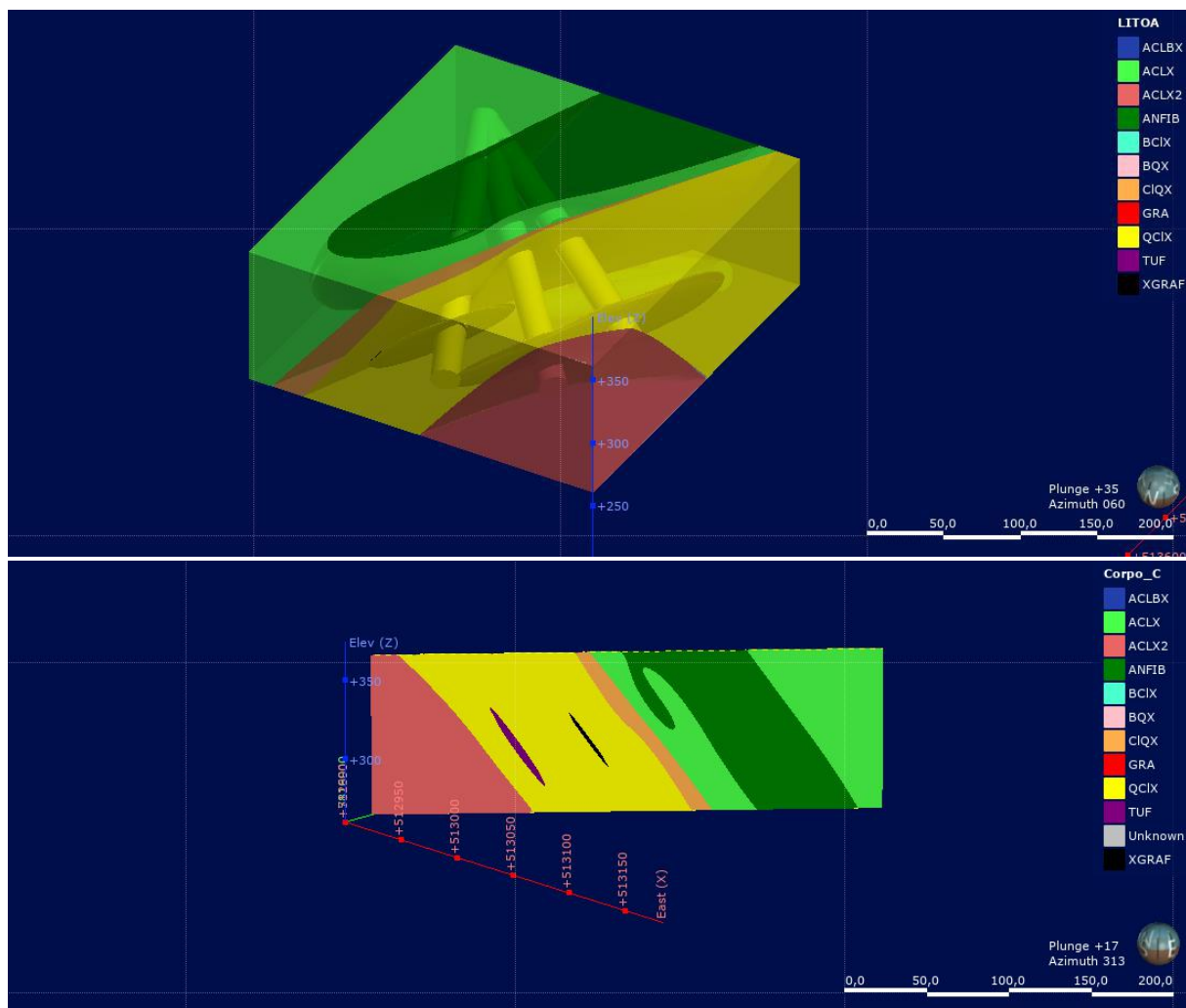


Figura 27: a) Modelo geológico simplificado do corpo C, a partir da descrição dos furos FTS-1488, FTS-1486 e FTS-1487. (Verde=actinolita clorita xisto (metabasalto); verde escuro= actinolita clorita xisto porfirítico (anfíbolito); laranja=clorita quartzo xisto; amarelo =quartzo clorita xisto (metassedimentar); preto=xisto grafitoso; roxo= metatufo; vermelho=actinolita clorita xisto (metaandesito). b) Seção vertical do corpo C.

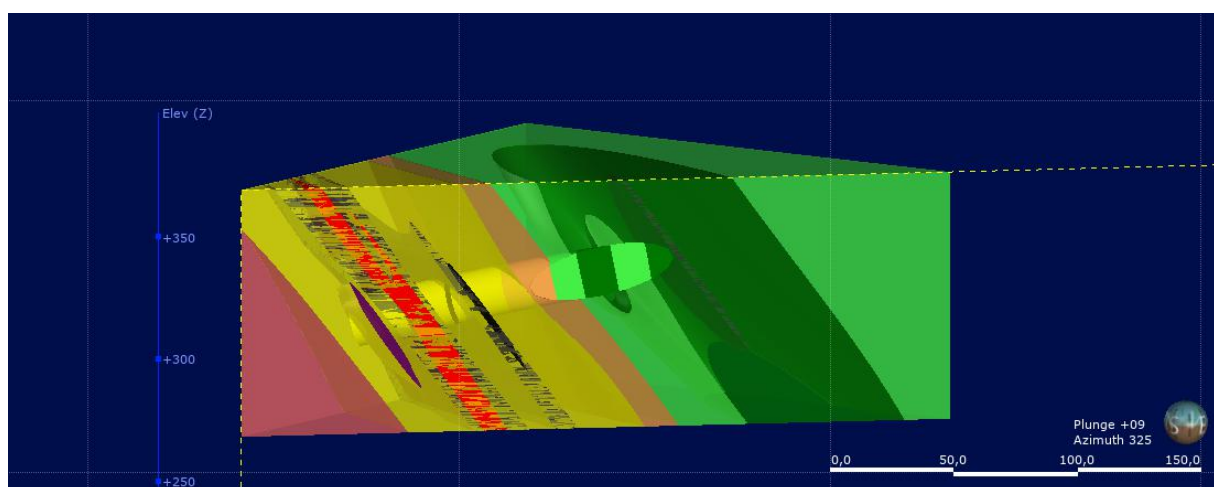


Figura 28: Seção vertical do modelo litológico com modelo do corpo de minério (Au) sobreposto. As cores cinza e vermelho representam as classes de ouro definidas; respectivamente, de teor médio (1-5 g/t) e de alto teor (>5 g/t).

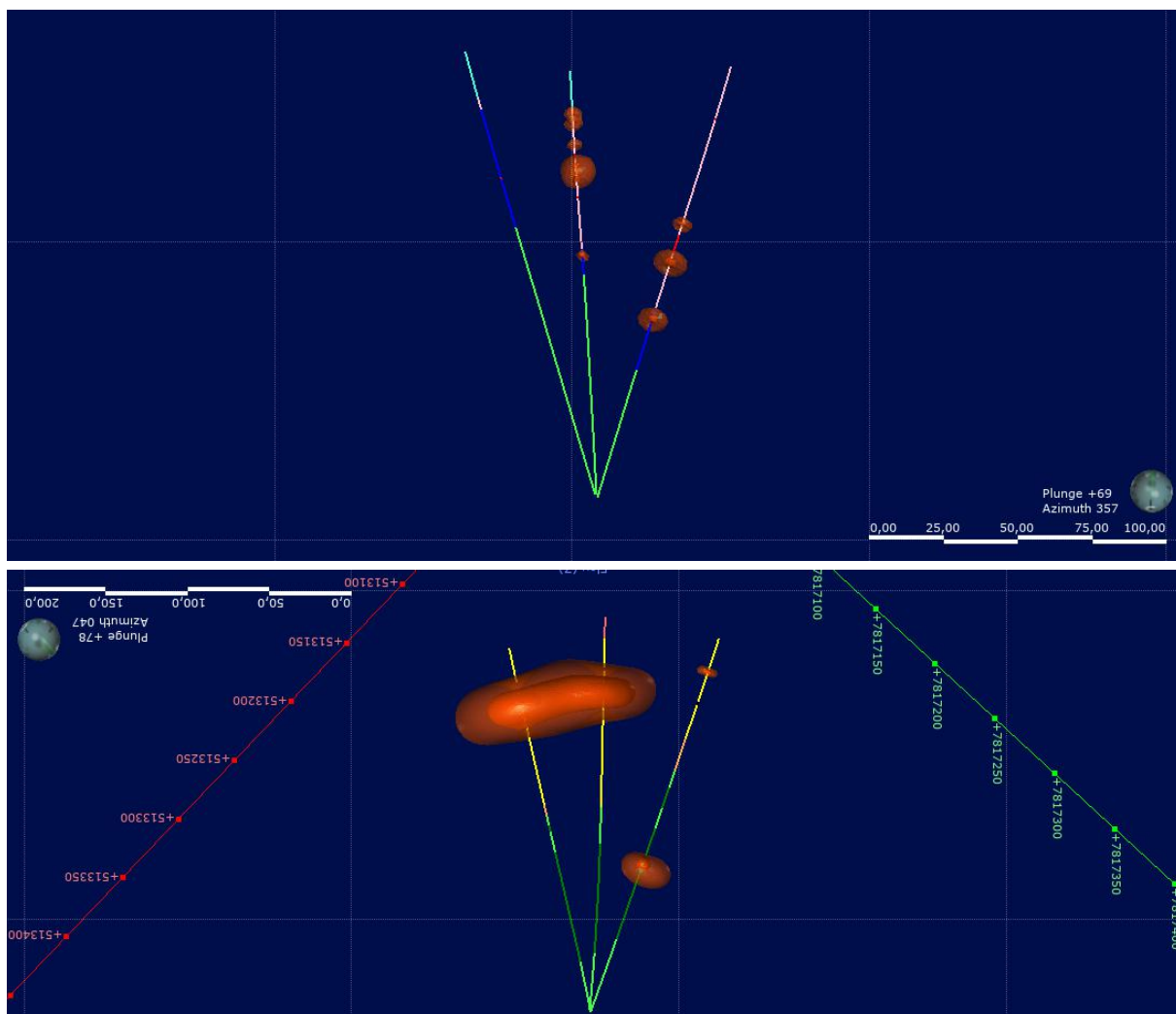


Figura 29: Zonas com enriquecimento em prata dos depósitos A (a) e C (b). Classes de teor definidas pelo software: 0,12-0,23 g/t; 0,23-0,39 g/t; >0,39 g/t.

A seção geológica do corpo C (figura 27) evidencia estratigrafia composta na base de rochas metavulcânicas intermediárias, seguidas de intervalo metassedimentar com intercalação de rocha vulcanoclástica, e conjunto metavulcânico máfico. Como os intervalos de metalapillitifo e xisto grafitoso são muito delgados, optou-se por não extrapolar muito suas superfícies ao longo do mergulho das camadas.

Na figura 28, o corpo de minério (Au) está contido entre os níveis de xisto grafitoso e de metalapillitifo. Os altos teores de ouro encontram-se no núcleo do corpo mineralizado, envolto por uma capa de menor teor.

No modelo de corpos enriquecidos em prata (Figura 29), a partir do resultado obtido com o software não foram realizadas demais edições manuais. Os enriquecimentos em prata acompanham os picos de ouro, como também é

ilustrada nas imagens 11 e 18, no tópico de descrição das mineralizações. No corpo A, a prata forma diversos corpos pequenos e segregados. No corpo C, esse elemento forma dois corpos com volumes um pouco maiores.

No modelo conjugado, as informações foram extrapoladas espacialmente com intuito de poder correlacionar as litologias dos dois corpos e, comparar com as informações de superfície (figura 30), por meio do mapa geológico da região da mina. Nesta representação, os metabasaltos dos corpos A e C são considerados em um único conjunto. Além disso, intervalos muito delgados não puderam ser abordados neste modelo. Sendo assim, uma aproximação da estratigrafia da mina registra, sobreposição de metaandesitos, conjunto metavulcano-sedimentar, conjunto metavulcânico máfico, seguidos de metaandesitos e metadacitos.

Na tentativa de comparar o mapa geológico da mina com os resultados de subsuperfície (figura 31), observou-se boa correlação. Por exemplo, o conjunto metavulcano-sedimentar, que hospeda a mineralização do corpo C, coincide com os depósitos C-NW, C-Central, C-SE. No caso do depósito A, a sobreposição desses mapas indica que este corpo se concentra apenas no conjunto metavulcânico máfico, o que, de acordo com os dados de descrição de testemunho, não é verdade. Isso pode ser fruto de deformações provocadas pela demasiada extrapolação dos dados no modelo 3D e/ou de contatos levemente deslocados no mapa de superfície, dada a falta de afloramentos.

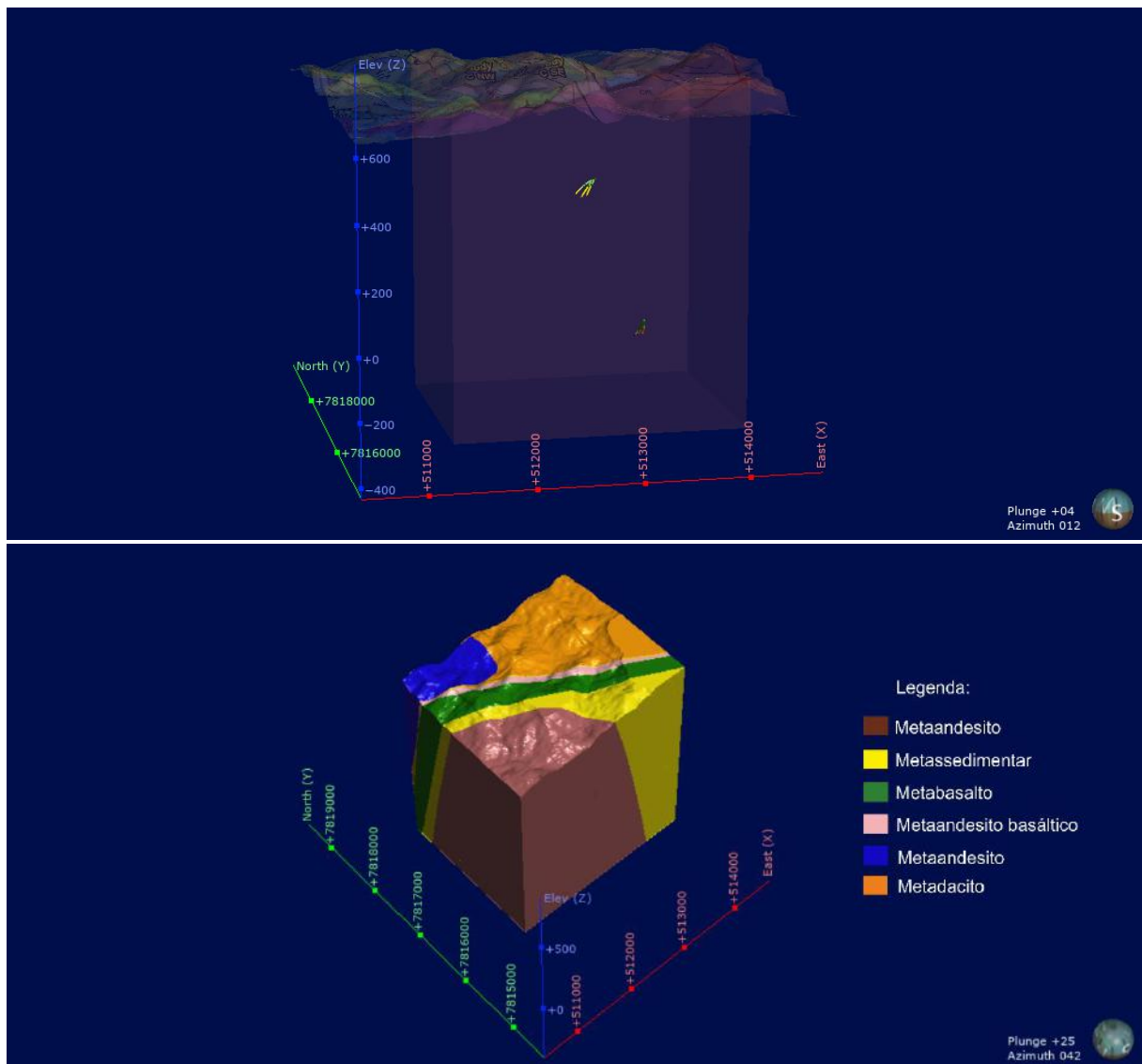


Figura 30: a)Visão do posicionamento espacial dos furos trabalhados, corpo C (superior) e A (inferior), em relação a superfície. b)Modelo geológico conjugado e extrapolado dos corpos A e C, da mina de Turmalina. (Legenda de cores: vinho=metaandesito; amarelo= conjunto metavulcano-sedimentar; verde=conjunto metavulcânico máfico (A e C); rosa=metaandesito basáltico; laranja=metadacito; azul=metaandesito).

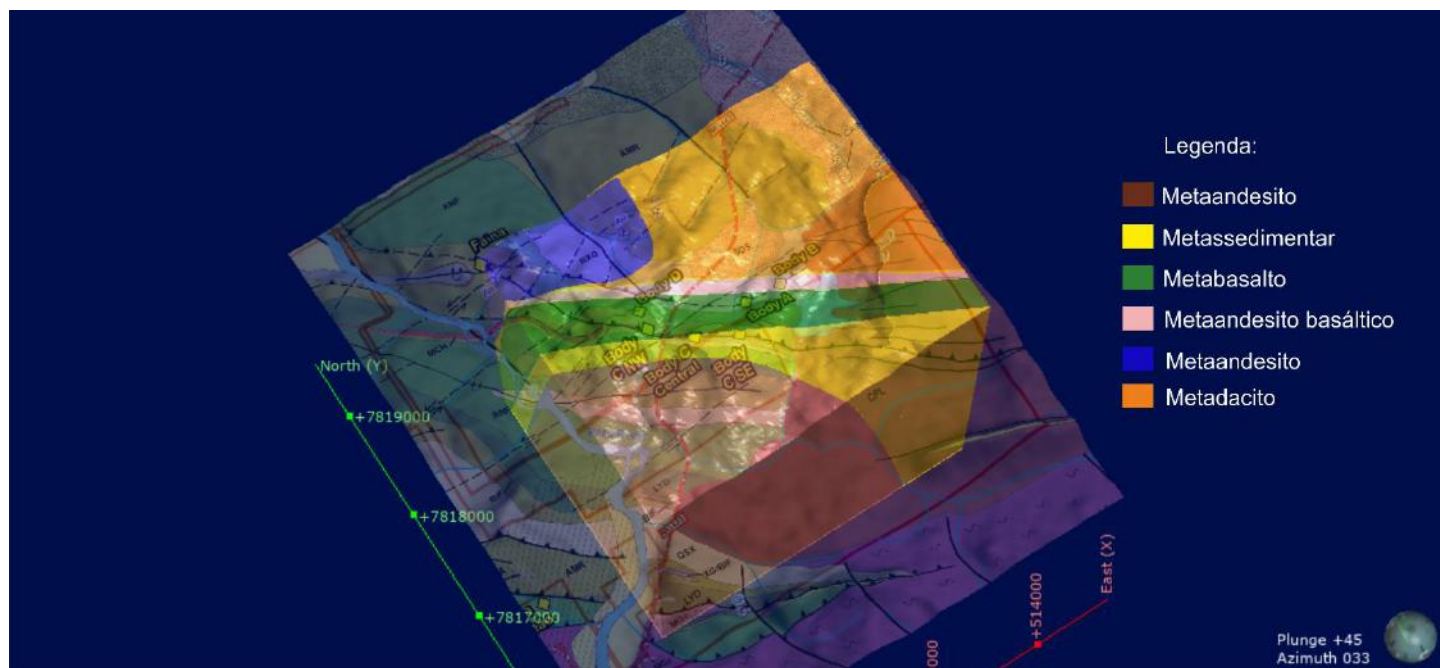


Figura 31: Modelo geológico conjugado sobreposto por mapa geológico, cedido pela MSOL. (Corpo D é continuação do corpo A).

5. DISCUSSÃO

Os corpos A e C, de acordo com mapa geológico da região (figura 4) encontram-se no flanco invertido de uma dobra sinclinal reclinada e, conseqüentemente a estratigrafia está invertida. Nesse sentido, a rocha mais antiga encontrada nos testemunhos descritos é o metadacito do corpo A, seguido de metaandesito, metaandesito basáltico, conjunto metavulcânico máfico, conjunto metavulcano-sedimentar, e outro metandesito diferente no fim.

De acordo com os diagramas tipo *Harker*, para elementos maiores e menores, o conjunto de metabasaltos, metabasilto andesítico e metaandesito basáltico é fruto da evolução magmática de um mesmo magma parental. Os *trends* positivos de TiO_2 , Al_2O_3 , P_2O_5 , FeO_t e Y em relação ao Zr , e os possíveis *trends* negativos de Cr , Ni e MgO sugerem cristalização fracionada de olivina e piroxênio.

As rochas hospedeiras do depósito C são unicamente metassedimentares, e o conjunto de rochas máficas pode ser considerado estéril. O intervalo mineralizado do corpo C ocorre em horizonte bem peculiar, entre camadas metapelíticas ricas em carbono e camada de metalapillitufo. Esse contexto sugere que essas rochas podem

ter atuado como espécie de trapa, química ou física, contribuindo para estabelecimento das condições ideais à deposição do ouro. Vale destacar que metalapilitufos também foram descritos por Faria et al. (2017) e Brando Soares et al., 2017, intercalado em níveis metassedimentares do depósito São Sebastião. Nesse sentido, essas rochas podem ser consideradas importante camada-guia para exploração mineral de novas áreas na região.

A rocha hospedeira da mineralização no corpo A é unicamente metavulcânica intermediária. As demais litologias desse corpo apresentam teores de ouro desprezíveis. O Granito Casquilho foi datado em 2,65Ga (Tassinari et al., 2015) e, aparece nos testemunhos como pequenas apófises que intrudem o embasamento arqueano e a mineralização. Isso sugere que o evento de enriquecimento é possivelmente mais velho que a intrusão granítica. No entanto, como é discutido pela bibliografia, também é possível que tenha havido impute de fluídos magmáticos. Neste trabalho, os resultados indicam que os maiores teores de ouro ocorrem nas adjacências das intrusões graníticas e dados de isótopos de enxofre (Fabrício-Silva et al., 2018) apontam origem magmática para os fluídos mineralizantes.

As associações metálicas do minério para o corpo A e C apontam correlação positiva de Au com As, Ag, Bi, S, sendo o corpo C mais rico em Ag e S que o corpo A. No caso específico da prata, apesar de mostrar correlação positiva para ambos corpos estudados, a disposição espacial das zonas enriquecidas, indicada no modelo 3D simplificado, é diferente. Em A, esse minério é menor e segmentado e, em C, forma dois corpos mais volumosos. Segundo Brando Soares et al., 2018, no depósito São Sebastião, os elementos Ag, Bi e S também são enriquecidos com aumento do teor de Au, porém As não. Co e Cu apresentam padrão disperso no corpo A, porém têm tendência positiva em C. O fato de haver enriquecimento maior de Cu em C corrobora com a maior presença de calcopirita nesse corpo. No depósito São Sebastião, apenas um dos corpos mineralizados possui correção positiva com Cu e nenhum com Co. Te e Zn mostram correlação positiva com Au, no corpo C, enquanto para o corpo A as concentrações são baixas e não há *trend*.

Análises de microscópio eletrônico de varredura de Fabrício-Silva *et al.* (2018) mostram que o ouro nativo na mina Turmalina ocorre como inclusão em pirrotita, pirita, sempre próximo à arsenopirita ou como grãos livres em equilíbrio com arsenopirita. Macroscopicamente, a mineralização dos corpos A e C é marcada principalmente pela

ocorrência de arsenopirita. Pirita também apresenta boa correlação com ouro em ambos corpos. Pirrotita e calcopirita, porém, apresentam menores concentrações, que, no corpo A, são menores ainda. O tipo de mineralização mais comum, em ambos os corpos, é de sulfetação fina e disseminada ao longo da rocha e planos de foliação, sendo mais fina ainda no caso do corpo A. Em C, também podem ocorrer texturas brechóides. Neste caso, os sulfetos podem ocorrer disseminados ou maciços na matriz da brecha, e pirrotita pode estar mais concentrada. Outro aspecto em comum entre as mineralizações nos corpos A e C são as relações de altos teores de Au com presença de veios de quartzo, de diversos tipos. Contudo, esses altos teores também estão relacionados ao tipo de alteração hidrotermal; a silicificação e cloritização são, dentre as observadas, as mais intensas nas zonas mineralizadas estudadas.

6. CONCLUSÕES

A estratigrafia dos corpos A e C compõe um pacote de rochas arqueanas, metamorfasadas em fácies anfibolito, sendo composta por intercalações de rochas vulcânicas intermediárias, rochas sedimentares e vulcânicas máficas. As rochas máficas de ambos os corpos foram identificadas como sendo de uma mesma série evolutiva, que se inicia com o andesito basáltico do corpo A em direção aos basaltos do corpo C. Somado ao fato de os metabasaltos assumirem os mesmos *trends* para os elementos maiores (figura 23), as concentrações e padrões de elementos terras raras (figura 22) entre essas rochas também é semelhante e, portanto os metabasaltos dos corpos A e C foram consideradas como parte de um único conjunto. O fato da ocorrência de metaandesitos diferentes, de provável natureza intrusiva, tanto na base quanto no topo da estratigrafia, implica que as rochas estudadas possuem uma evolução complexa.

O horizonte mineralizado do corpo C se encontra nas rochas metassedimentares, especificamente entre as camadas de metapillitatufo e xisto carbonoso, e isso sugere que a deposição do ouro nessa região foi influenciada física ou quimicamente por essas litologias. Ainda, essas rochas também ocorrem em meio ao pacote metassedimentar no depósito São Sebastião e constituem, portanto, uma importantes camadas-guia para estudos de prospecção mineral na região do *Greenstone Belt* Pitangui. Já no corpo A, a rocha hospedeira da mineralização, trata-se de metadacito.

Os corpos mineralizados, desse depósito, ocorrem de forma escalonada, segmentados pelas intrusões graníticas e, os teores de ouro mais elevados ocorrem no contato com as apófises. De um ponto de vista econômico, a mineralização nos corpos A e C é restrita a essas duas litologias e as demais rochas podem ser consideradas estéreis.

Os *trends* dos diagramas multi-elementares indicam associação metálica de Au, As, Ag, S e Bi para os corpos A e C da mina Turmalina, e essas associações, com exceção do As, são as mesmas que ocorrem no depósito São Sebastião. O corpo C ainda apresenta associação com Te, Zn, Cu e Co. A correlação positiva de Cu com Au no corpo C reforça a importância da calcopirita nesta mineralização. Com base na descrição macroscópica das rochas e nos diagramas multi-elementares, pode-se concluir que mineralização está diretamente ligada a sulfetação. Os principais sulfetos ligados ao ouro, em ambos corpos estudados, são a arsenopirita, seguida de pirita e, isso é comprovado pelos *trends* positivos de As e S, além da alta concentração desses minerais em zonas mineralizadas. Pirrotita e calcopirita são menos abundantes, especialmente no corpo A. Uma grande diferença entre os depósitos de Turmalina e São Sebastião é, portanto, que apesar de ambos possuírem arsenopirita na assembleia de sulfetos, em Turmalina o Au está fortemente correlacionado com As, e no São Sebastião não. Esta diferença pode indicar processos mineralizantes distintos ocorrendo em rochas de natureza e idade similares.

Com isto, é possível observar que a abordagem de análises geoquímica multi-elementares constituem uma importante ferramenta para entendimento da complexidade dos depósitos, auxiliando de forma eficiente em projetos de prospecção mineral. O conhecimento das associações metálicas de uma jazida possibilita também abordar a geometalurgia, comparando os elementos que compõe o minério diretamente com processos de beneficiamento.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Alkmim, F.F., Marshak, S., 1998. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Res.* 90, 29–58.

Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1981. Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth-Science Reviews* 17, 1–29.

Baltazar, O. F., & Zucchetti, M. (2007). Lithofacies associations and structural evolution of the Archean Rio das Velhas greenstone belt , Quadrilátero Ferrífero , Brazil: A review of the setting of gold deposits, 32, 471–499. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.03.021>

Barbosa, J.S.F., Sabate, P., 2004. Archean and Paleoproterozoic crust of the Sao Francisco Craton, Bahia, Brazil: geodynamic features. *Precambrian Research* 133,1–27.

BOYNTON, W.V. Cosmochemistry of the Rare Earth Elements: Meteorite Studies. *Developments in Geochemistry*, p. 63-114, 1984.

Brando Soares, M., Corrêa Neto, A. V., Zeh, A., Cabral, A. R., Pereira, L. F., Prado, M. G. B. do, Schlichta, T. M. (2017). Geology of the Pitangui greenstone belt, Minas Gerais, Brazil: Stratigraphy, geochronology and BIF geochemistry. *Precambrian Research*, 291, 17–41. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2017.01.008>

Brando, M., Vasconcelos, A., Carlos, L., Emerson, F., Modesto, M., Mendes, I., Henrique, P., Oliveira, R., Guimarães, L. 2018. Multistage mineralization at the hypozonal São Sebastião gold deposit ,. *Ore Geology Reviews*, 102(October), 618–638. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2018.09.028>

Carneiro, M.A., 1992. O Complexo Metamórfico Bonfim Setentrional (Quadrilátero Ferrífero, MG): Litoestratigrafia e evolução geológica de um segmento de crosta continental do Arqueano. Tese de PhD. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo. 233.

Chemale Jr., F., Rosière, C.A., Endo, I., 1994. The tectonic evolution of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Res.* 65, 22–54.

Dorr II, J.V.N., 1969. Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey, Professional Paper 641-A, 1–110.

Fabricio-Silva, W., Rosière, C. A., & Bühn, B. (2018). The shear zone-related gold mineralization at the Turmalina deposit, Quadrilátero Ferrífero, Brazil: structural evolution and the two stages of mineralization. *Mineralium Deposita*, 1–22.

Faria, L. R. (2018). Trabalho Final de Curso - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Litogeoquímica de rochas metavulcânicas e estratigrafia do alvo exploratório São Francisco (Au), Greenstone Belt Pitangui, Minas Gerais (MG), Brasil.

FARINA, F.; ALBERT, C.; LANA, C.. The Neoproterozoic transition between medium- and high-K granitoids: Clues from the Southern São Francisco Craton (Brazil). *Precambrian Research*, v. 266, 375-394p., 2015.

Furnes, H. and Robins, B. (2012) 'GEOCHEMISTRY AND PETROLOGY OF LAVAS IN THE UPPER ONVERWACHT SUITE, BARBERTON MOUNTAIN LAND, SOUTH AFRICA', 115, pp. 171–210.

Furnes, H., Wit, M. De and Robins, B. (2013) 'A review of new interpretations of the tectonostratigraphy, geochemistry and evolution of the Onverwacht Suite, Barberton Greenstone Belt, South Africa', *Gondwana Research*. International Association for Gondwana Research, 23(2), pp. 403–428. doi: 10.1016/j.gr.2012.05.007.

Gair, J.E., 1962. Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio Acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil. U.S. Geological Survey, Professional Paper 341-A, 1–67.

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Gebre-Mariam, M., Hagemann, S.G., Robert, F., 1998. Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types. *Ore Geol. Rev.* 13 (1–5), 7–27.

Groves, D.I., Goldfarb, R.J., Robert, F., Hart, C.J.R., 2003. Gold deposits in metamorphic belts: overview of current understanding, outstanding problems, future research, and exploration significance. *Econ. Geol.* 98, 1–29.

GUADAGNIN, F., CHEMALE, F., MAGALHÃES, A. J., SANTANA, A., DUSSIN, I., e TAKEHARA, L. Age constraints on crystal-tuff from the Espinhaço Supergroup—

Insight into the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic intracratonic basin cycles of the Congo–São Francisco Craton. *Gondwana Research*, 27(1), 363–376, 2015.

Guadagnin, F. and Jr, F. C. (2017) 'Age constraints on crystal-tuff from the Espinhaço Supergroup — Insight into the Paleoproterozoic to Mesoproterozoic intracratonic basin cycles of the Congo – São Francisco Craton', *Gondwana Research*. International Association for Gondwana Research, 27(1), pp. 363–376. doi: 10.1016/j.gr.2013.10.009.

HARTMANN, L. A., ENDO, I., SUITA, M. T. F., SANTOS, J. O. S., FRANTZ, J. C., CARNEIRO, M. A., ... E BARLEY, M. E. Provenance and age delimitation of Quadrilátero Ferrífero sandstones based on zircon U–Pb isotopes. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 20(4), p. 273–285, 2006.

Ladeira, E.A., 1980. Metalogenesis of gold at the Morro Velho Mine, and in the Nova Lima District, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Unpublished Ph.D. Thesis. University of Western Ontario, Canada, 272 pp.

Ladeira, E.A., 1981. Primeiras lavas com almofadas (pillows) encontradas no Supergupo Rio das Velhas, de idades Arqueana, no Quadrilátero Ferrífero e no Distrito de Pitangui, Minas Gerais. *Ciencias da Terra* 1, 12–14.

Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H.A., 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambr. Res.* 230, 1–30.

Ledru, P., Johan, V., Milesi, J.P., Tegye, M.J., 1994. Evidence for a 2 Ga continental accretion in the circum-south Atlantic provinces. *Precambrian Research* 69, 169–171.

Lobato, L.M., Vieira, F.W.R., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Pereira, L.M.M., Menezes, M.G., Junqueira, P.A., Pereira, S.L.M., 1998. Styles of hydrothermal alteration and gold mineralization associated with the Nova Lima Group of the Quadrilátero Ferrífero: part I, description of selected gold deposits. *Revista Brasileira de Geociências* 28, 339–354.

Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Zucchetti, M., Noce, C.M., Baltazar, O.F., da Silva, L.C., Pinto, C.P., 2001a. Brazil's premier gold province. Part I: the tectonic,

magmatic and structural setting of the Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 228–248.

Lobato, L.M., Ribeiro-Rodrigues, L.C., Vieira, F.W.R., 2001b. Brazil's premier gold Province. Part II: geology and genesis of gold deposits in the Archaean Rio das Velhas greenstone belt, Quadrilátero Ferrífero. *Mineralium Deposita* 36, 249–277.

Lobato, L. M., Santos, J. O. S., Mcnaughton, N. J., Fletcher, I. R., & Noce, C. M. (2007). U – Pb SHRIMP monazite ages of the giant Morro Velho and Cuiabá gold deposits , Rio das Velhas greenstone belt , Quadrilátero Ferrífero , Minas Gerais, Brazil, 32, 674–680. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.11.007>

Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G., 1996. Ages of detrital zircon from Archean–Paleoproterozoic sequences: implications for greenstone belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters* 141, 259–276.

Middlemost, E. A. K. (1994). *Naming materials in the magma/igneous rock system. Earth-Science Reviews*, 37(3-4), 215–224. doi:10.1016/0012-8252(94)90029-9

Noce, C.M., Zucchetti, M., Baltazar, O.F., Armstrong, R., Dantas, E.L., Renger, F.E., Lobato, L.M., 2005. Age of felsic volcanism and the role of ancient continental crust in the evolution of the Neoarchean Rio das Velhas greenstone belt (Quadrilátero Ferrífero, Brazil): SHRIMP and ID-TIMS U-Pb zircon dating of volcanoclastic graywackes. *Precamb. Res.* 141, 67–82.

Noce, C.M., Tassinari, C., Lobato, L.M., 2007. Geochronological framework of the Quadrilátero Ferrífero, with emphasis on the age of gold mineralization hosted in Archean greenstone belts. *Ore Geology Reviews* 32, 500–510

O'Rourke, J.E., 1957. The stratigraphy of metamorphic rocks of the Rio de Pedras and Gandarela quadrangles, Minas Gerais, Brazil. Unpublished Ph.D. Thesis. University of Wisconsin, USA, 106 pp

Pinto C.P. & Silva M.A. 2014. *Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, Escala 1:1.000.000*. Companhia de Desenvolvimento Econômico de Minas Gerais, CODEMIG e Serviço Geológico do Brasil, CPRM.

Renger, F.S., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N., 1994. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos* 2, 1–11.

Romano, A.W., 1989. Evolution tectonique de la region NW du Quadrilatere Ferrifere – Minas Gerais, Bresil. Unpublished PhD Thesis. University of Nancy, France, 259 pp.

ROMANO, A. Programa Geologia do Brasil. Folha Pará de Minas. SE-23-Z-CI. Escala 1: 100.000, relatório final. UFMG-CPRM, Belo Horizonte. 72p, 2007.

ROMANO, R., LANA, C., ALKMIM, F. F., STEVENS, G., & ARMSTRONG, R. Stabilization of the southern portion of the São Francisco craton, SE Brazil, through a long-lived period of potassic magmatism. *Precambrian Research*, 224, 143-159. 2013

RPA Consulting and Jaguar Mining Inc.. Technical Report on the Turmalina Mine, Minas Gerais State, Brazil, 175p. 2017.
https://www.jaguarmining.com/site/assets/files/1723/2016-05-24_ni-43-101.pdf

SANTOS, K. N. D. S. Caracterização estratigráfica e geoquímica das rochas metavulcânicas do alvo Aparição, Onça do Pitangui - Mg / Instituto de Geociências – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Trabalho Final de Curso, 71 p, 2017.

SRK CONSULTING AND IAMGOLD CORPORATION. Independent Technical Report for the São Sebastião Gold Deposit, Pitangui Project, Brazil. 84p, 2014.

SILVA, P. D. M. Evolução meso e neoarqueana do Greenstone belt de Pitangui e seu embasamento, sul do Cráton do São Francisco (MG): petrografia, geoquímica e geocronologia. Programa de Pós-graduação em Geologia, Unicamp, Campinas – SP, 93p, 2016.

Schrank, A., Machado, N., 1996. Idades U-Pb em monazitas e zircões do distrito aurífero de Caeté, da mina de Cuiabá e do depósito de Carrapato-Quadrilátero Ferrífero (MG). 39th Congresso Brasileiro de Geologia. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, pp. 473–475

Schrank, A., Machado, N., Stern, R., 2002. Eventos no Arqueano com base em idades U/ Pb–SHRIMP de zircões detríticos em metassedimentos da mina de Morro Velho-Quadrilátero Ferrífero–Minas Gerais. In: , Sociedade Brasileira de Geologia, João Pessoa, pp. 527.

Tassinari, C. C. G., Mateus, A. M., Velásquez, M. E., Munhá, J. M. U., Lobato, L. M., Bello, R. M., Campos, W. F. (2015). Geochronology and thermochronology of gold mineralization in the Turmalina deposit , NE of the Quadrilátero Ferrífero Region , Brazil. *Ore Geology Reviews*, 67, 368–381. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.12.013>

Teixeira, W., Figueiredo, M.C.H., 1991. An outline of Early Proterozoic crustal Evolution in the Sao Francisco craton, Brazil: a review. *Precambrian Research* 53 (1–2), 1–22.

Teixeira, W., Carneiro, M.A., Noce, C.A., Machado, N., Sato, K., Taylor, P.N., 1996. Pb, Sr and Nd isotope constraints on the Archean evolution of gneissic granitoid complexes in the southern Sao Francisco craton, Brazil. *Precambrian Research* 78, 151–164.

Teixeira, W., Sabate, P., Barbosa, J.S.F., Noce, C.M., Carneiro, M.A., 2000. Archean and Paleoproterozoic Tectonic evolution of the Sao Francisco craton, Brazil. In: Cordani, U.G., Milani, E.J., Thomas Filho, A., Campos, D.A. (Eds.), *Tectonic Evolution of the South America*, vol. 31. International Geologic Congress, Rio de Janeiro, Brazil, pp. 101–137.

Teixeira, W., Ávila, C.A., Dussin, I.A., Corrêa Neto, A.V., Bongioiolo, E.M., Santos, J.O., Barbosa, N.S., 2015. A juvenile accretion episode (2.35–2.32 Ga) in the Mineiro belt and its role to the Minas accretionary orogeny: zircon U-Pb–Hf and geochemical evidences. *Precamb. Res.* 256, 148–169.

Thorman, C. H., Maron, M. A. C., Ladeira, E. A. Major Brazilian gold deposits ± 1982 to 1999. *Mineralium Deposita*, 218–227. (2001). <https://doi.org/10.1007/s001260100170>

VERMA, S. K., OLIVEIRA, E. P., SILVA, P. M., MORENO, J. A., & AMARAL, W. S. Geochemistry of komatiites and basalts from the Rio das Velhas and Pitangui

greenstone belts, São Francisco Craton, Brazil: Implications for the origin, evolution, and tectonic setting. *Lithos*, 284, 560-577. 2017.

Vial, D. S., Abreu, G. C., & Schubert, G. (2007). Smaller gold deposits in the Archean Rio das Velhas greenstone belt , Quadrilátero Ferrífero , Brazil, 32, 651–673. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2005.01.004>

Vial, D., Dewitt, E., Maria, L., & Thorman, C. H. (2007). The geology of the Morro Velho gold deposit in the Archean Rio das, 32, 511–542. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2004.12.008>

Vial, D. S., Groves I. D., Cook N. J., Lobato, L. M. (2006) Special issue on gold deposits of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil, 32, 469–470. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2006.11.006>

Vieira, F.W.R., 1991. Textures and processes of hydrothermal alteration and mineralization in the Nova Lima Group, Minas Gerais, Brazil. In: Ladeira, E.A. (Ed.), *Proceedings of Brazil GOLD'91, the Economics, Geology, Geochemistry and Genesis of Gold Deposits*. A.A. Balkema, Rotterdam, pp. 319–325.

Zalán, P.V., Silva, P.C.R., 2012. Bacia do São Francisco. In: Y. Hasui, C.D.R. Carneiro, F. F.M. de Almeida, A. Bartorelli, *Geologia do Brasil*. São Paulo, Beca-BALL Edições Ltda, pp. 245–247.